

Надётся А. А.

624.18

H-17.

Темновой расееи  
котельной уецамовки  
1927.

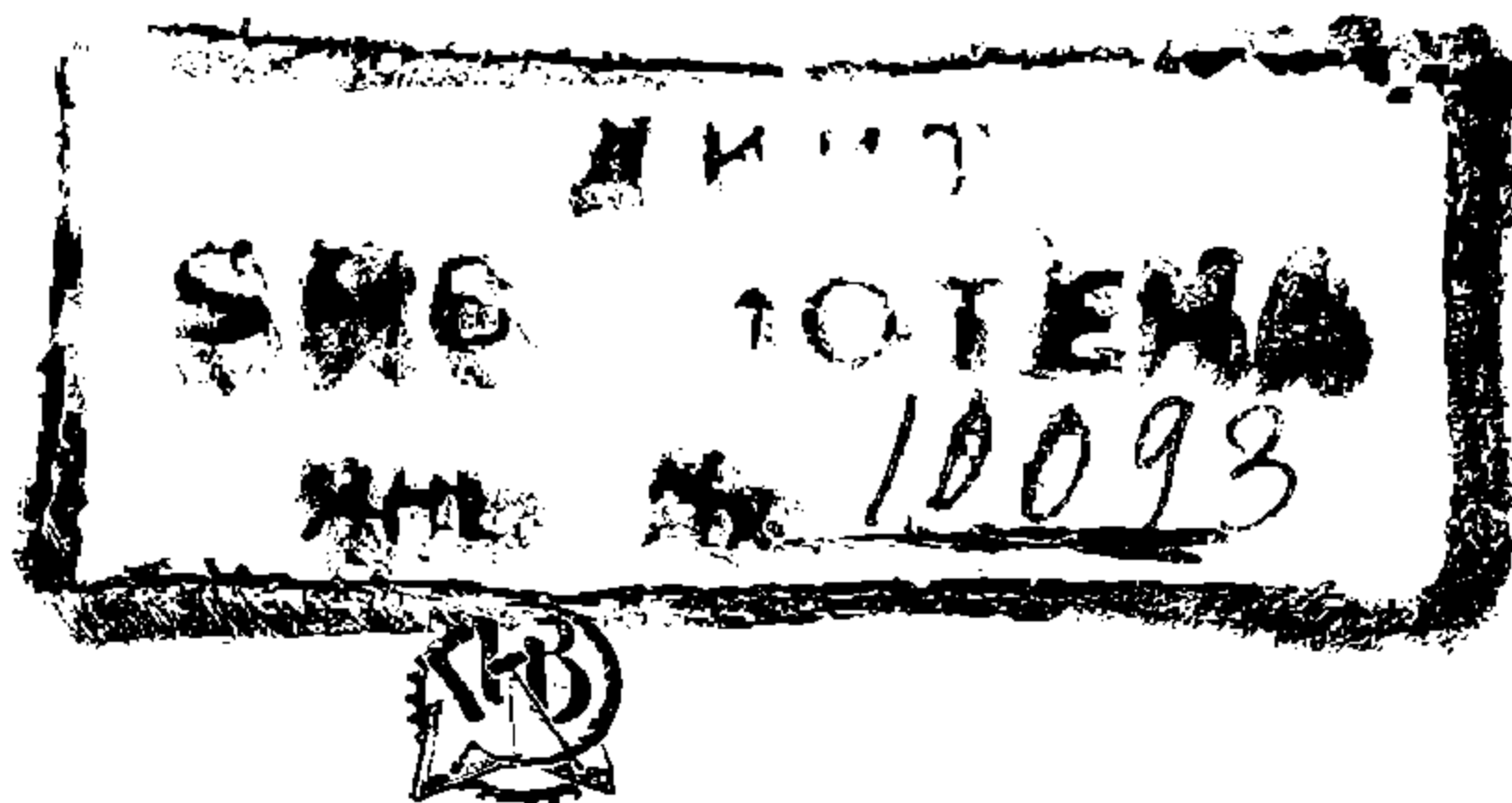
НБ  
УДУНТ  
(ДНТ)

ПОСОБИЯ ДЛЯ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

Проф. А. А. НАДЕЖИН

# ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

*Научно-Технической секцией Государственного Ученого Совета  
рекомендовано в качестве пособия для высших  
технических учебных заведений*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МОСКВА 1927 ЛЕНИНГРАД

НБ  
УДУНТ  
(ДЛТ)



Гиз. № 17945.  
Ленинградский Гублит № 38799.  
13<sup>8</sup>/<sub>4</sub> л. Тираж 5 000.

НБ  
УДУНТ  
(ДНТ)

## ПРЕДИСЛОВИЕ.

Весьма лестная для меня рецензия заслуженного профессора Московского Высшего Технического Училища П. К. Худякова,<sup>1)</sup> учеником коего я имел честь быть, побудила меня усилить мою работу над углублением теплового расчета котельных установок. В том же направлении содействовал также большой успех моей книги, разошедшейся полностью в первый же год ее выпуска.

Согласно пожеланий моих слушателей и читателей, настоящее пятое издание,<sup>2)</sup> почти полностью переработанное<sup>3)</sup> наново, дополнено выводами формул и примерами, цель которых — углубить понимание основ расчета и пояснить пользование формулами на практике.

Работая помимо высшей школы непосредственно в промышленности и будучи учеником дорогих моей памяти умерших учителей профессоров А. П. Гавриленко, В. И. Гриневецкого и К. В. Кирш, умело сочетавших науку и практику, я глубоко верю в то, что только совместная работа теоретиков и практиков может способствовать более быстрому расцвету нашей промышленности.

Поэтому отношение к моей работе как чистых практиков, так и деятелей технического образования, меня очень интересует, тем более, что я не считаю мою настоящую работу еще вполне законченной. Позволяю себе вновь обратиться к читателям с просьбой не отказать в любезности сообщить мне<sup>4)</sup> все свои пожелания и замечания по вопросам, разбираемым в настоящей работе.

Весьма ценные указания были сделаны мне инженер-механиком Д. А. Самойловым, моим сотрудником по работе в Москов-

<sup>1)</sup> «Вестник Инженеров» № 9, сентябрь 1924 г., стр. 34 — 35.

<sup>2)</sup> 1-е издание студентов МВТУ — март 1921 г.; 2-е их же — апрель 1922 г.; 3-е «Макиз» — Москва, октябрь 1923 г.; 4-е его же — июнь 1924 г.

<sup>3)</sup> Главы XXIX, XXX и XXXI сохранены в прежнем объеме из-за недостатка времени у автора.

<sup>4)</sup> Адрес Москва, Центр, Покровка, 31, кв. 3, профессору Алексею Алексеевичу Надежину.

НБ  
УДУНТ  
(ДНТ)

ском обществе технического надзора, где вопросам рационального использования тепла в котельных уделялось очень большое внимание.

Ограниченность объема книги не позволила мне разобрать вопросы наивыгоднейшего распределения работы между поверхностями нагрева котла, экономайзеров и подогревателей, а также вопроса о выборе места для пароперегревателя; эти вопросы столь обширны, особенно если вспомнить о паропроводах, об устройстве тяги и т. д., что нуждаются в особом руководстве.

Цель настоящего издания та же, что и предшествующих — помочь разобраться в сложных вопросах теплового расчета котельных установок, знание которого необходимо каждому работнику как в эксплуатации, так и в бюро по проектированию.

При подготовке к печати моей работы мне оказали большую помощь мои ассистенты, преподаватель Московского текстильного института, инженер И. В. Иванов-Загребалов, которому мы обязаны решением составленных мною примеров, и преподаватель Московского высшего технического училища, инженер А. А. Щукин, блестяще исполнивший все работы по изготовлению чертежей для клише.

Считаю весьма приятным долгом выразить мою глубокую благодарность инженеру Д. А. Самойлову за его ценные указания и инженерам И. В. Иванову-Загребалову и А. А. Щукину за их помощь в работе.

Очень рад засвидетельствовать весьма внимательное отношение Научного Отдела Госиздата к моей работе и образцовую постановку корректорского отдела, значительно облегчивших мой труд по ведению авторских корректур.

Приношу мою искреннюю благодарность всем сотрудникам Государственного Издательства, в той или иной мере потрудившимся над изданием настоящей моей книги, и, в частности, типографии Печатный Двор в Ленинграде, хорошо исполнившей весьма трудный набор.

*А. Надежин.*

НБ  
УДУНТ  
(ДНТ)

## ГЛАВА ПЕРВАЯ.

### ВВЕДЕНИЕ.

При проектировании котельной установки обычно требуется удовлетворить целому ряду условий не только технических, но и экономических.

Правильно спроектированная котельная установка должна давать пар наиболее дешевый, а следовательно, она должна иметь *минимум дорогой поверхности нагрева* и возможно высокий коэффициент полезного действия, т.-е. расходовать минимум топлива при заданной паропроизводительности.

Количество пара, которое должна давать котельная, и его качество обычно определяются, учитывая потребность в нем как на нагревательные цели, так и на производство силы при паровых двигателях.

Проектирующему котельную установку дается или график нагрузки котельной или же просто указывается количество пара, которое при нормальных условиях должна давать котельная при обязательной оговорке колебаний, т.-е. максимума и минимума (перегрузки и недогрузки).

Практически котельные почти не работают с постоянной нагрузкой; обычно нагрузка котлов колеблется в некоторых пределах.

Испытаниями установлено, что при переменной нагрузке, если не предусмотрено особых условий, качество пара, даваемого котельной, может меняться, а на основании эксплуатации и испытаний тепловых козьяйств мы знаем, сколь сильно влияет качество пара на его расход.

Увеличение расхода пара при падении его давления и перегрева общеизвестно. Оно-то и побуждает практиков требовать от проектирующих котельные установки известных гарантий не только количества, но и качества пара при переменных нагрузках.

НБ  
УДУНТ  
(ДНТ)

При задании нагрузки графиком проектирующий сам выбирает тип, число и мощность котлов, учитывая колебания нагрузок и характер потребителей пара. В противном случае проектирующему должны указать кроме нормального расхода пара также и возможные колебания не только в количестве пара, но и допустимые колебания его качества (давление, температура для перегретого пара и влажность для насыщенного пара).

Помимо соображений в выборе нужного давления и температуры пара, необходимо весьма серьезно обдумать вопрос о топливе.

Правильный выбор рода топлива — задача нелегкая при современных колебаниях цен на топливо.

Коммерческий расчет полной стоимости эксплуатации или установки при разных топливах дает нам возможность решить нашу задачу лишь при данных соотношениях в ценах, учитывая, конечно, ожидаемые колебания и перспективы в будущем.

Все коммерческие подсчеты должны делаться очень осторожно, ибо в качестве исходных величин мы пользуемся данными, подверженными резким изменениям при меняющейся конъюнктуре экономического рынка. На изменение цены топлива весьма заметно влияют также и политические события, предугадать которые, конечно, не всегда возможно.

Поэтому, проектируя установку на наиболее желательный род топлива, инженер должен предвидеть легкий переход на любое другое конкурирующее в данном районе топливо.

Вопросы о топливоснабжении в котельной, о шлакоудалении, о выборе тяги, об устройствах для питательной воды, ее очистка, подача и т. п. являются также основными при проектировании котельных.

Паропроводы, водопроводы, воздухопроводы, само здание наконец и целый ряд других вопросов — все это должно быть тщательно продумано.

Неразумная экономия времени при проектировании всегда влечет за собою большие затруднения в последующей эксплуатации на практике.

Вопросов, и притом весьма интересных, очень много. Осветить их все в настоящей работе мы не беремся.

Мы ставим себе в настоящее время лишь задачу — дать проектирующим хотя бы небольшое пособие, могущее уяснить и облегчить работу по тепловому расчету котельной установки.

УДКУНТ  
(ДИТ)

Опираясь на имеющийся, к сожалению, в недостаточном еще количестве, опытный материал, приходится при тепловом расчете котельной установки задаваться целым рядом необходимых для расчета величин, что безусловно крайне затрудняет работу, особенно лицу, впервые приступающему к проектированию котельной установки.

Величины, которыми приходится задаваться, не стоят особняком, а находятся в тесной связи с конкретными формами выполняемой установки.

Опытные коэффициенты теплопередач, прямой отдачи толки и отдельные потери в котельной, как-то: химическая и механическая неполнота горения, потери в окружающую среду, а также величины коэфф. избытка воздуха и присосов в кладке, взяты мною главным образом на основании трудов проф. К. В. Кирш, Лаборатории паровых котлов МВТУ и личной практики.

При пользовании ими надо иметь в виду, что величины эти не носят характера точно установленных, а имеют лишь относительный характер и должны рассматриваться как первое приближение.

## ГЛАВА ВТОРАЯ.

### ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.

На фиг. 1 показана полная схема современной котельной установки, из рассмотрения которой мы видим, что далеко не все тепло, внесенное в топку, полезно утилизируется, часть его теряется при провале топлива через колосники, при уносе его в газоходы, с дымовыми газами, уходящими в трубу при температуре, значительно превосходящей температуру окружающей среды, и т. д.

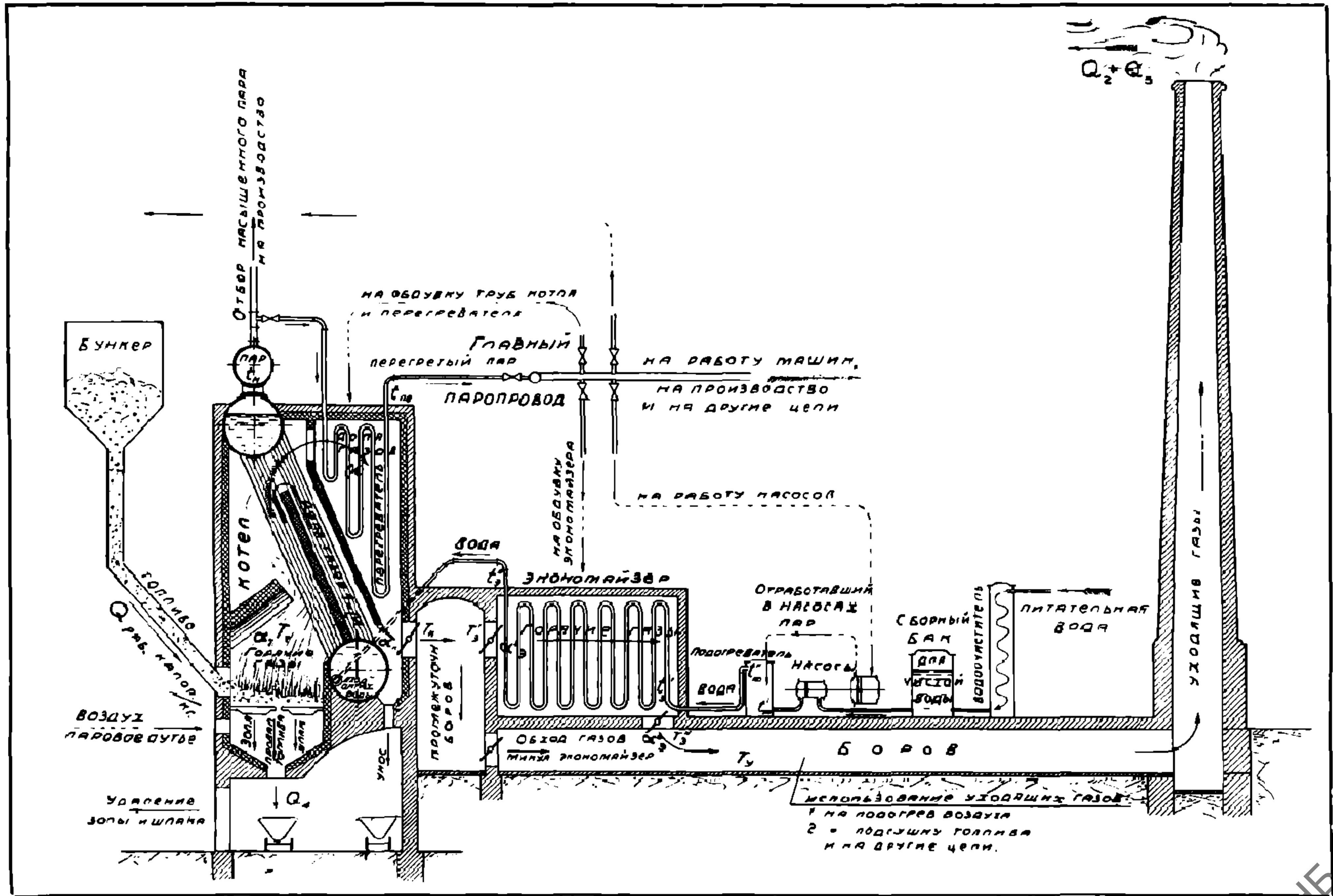
Для уяснения себе полной картины рассмотрим случай установившейся работы котельной.

Пусть при установившемся режиме в котельной сжигается каждый час  $B$  килограммов топлива.

На каждый один килограмм топлива вводится в топку  $Q_t$  калорий тепла, которое складывается из тепла топлива и из тепла воздуха и пара, поступивших в топку вместе с топливом. Количество их, а равно и качество, должно быть учтено при вычислении величин  $Q_t$  калорий.

УДМУНТ  
(ДИТ)





Фиг. 1. Схема котельной установки.

НЕ  
УДУНТ  
(ДИТ)

Все тепло  $Q_{т.}$ , внесенное в топку котла, расходуется:

1) полезно:

в экономайзере для подогрева воды	$Q_1^{э.к.}$
в котле для дальнейшего подогрева воды и для получения пара	$Q_1^{к.}$
в пароперегревателе для подсушки и перетрева пара	$Q_1^{п.э.}$
в экономайзере для подогрева воздуха, идущего затем в топку, и на другие цели <sup>1)</sup>	$Q_1^{в.}$

2) на покрытие потерь:

с отходящими газами, имеющими температуру $T^{\circ}C$	$Q_2$
от химической неполноты горения	$Q_3$
от механической неполноты горения	$Q_4$
в окружающую среду поверхностным охлаждением	$Q_5$

Следовательно основное уравнение баланса тепла в котельной при установившемся тепловом ее состоянии должно иметь вид:

$$Q_{т.} + Q_{пр.} = Q_1 + Q_1^{в.} + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (1)$$

где

$$Q_1 = Q_1^{э.к.} + Q_1^{к.} + Q_1^{п.э.} \quad (2)$$

Член  $Q_{пр.}$  в левой части равенства учитывает тепло присоса, внесенное воздухом, засосанным через неплотности в обмуровке.<sup>2)</sup>

Когда состояние котельной не установилось в тепловом отношении, то в правую часть уравнения (1) следует внести еще одно

<sup>1)</sup> Нередки случаи, когда подогретый в экономайзере за счет теплоты отходящих газов воздух расходуется на производственные нужды вне котельной, как например: в сушильные аппараты, на вентиляционные и отопительные цели; в этих случаях тепло, пошедшее на его нагрев, есть поистине полезное тепло.

У нас в России, по крайней мере в Центрально-Промышленном районе, уже в довоенное время имелись такого рода установки с двумя экономайзерами — «водяным» и «воздушным», при чем теплый воздух использовался для вентиляции красильных фабрик, а также и для других нужд производства.

<sup>2)</sup> Даже при безукоризненном уходе за обмуровкой избежать присоса воздуха в газоходы не всегда представляется возможным. Так, например, при наличии экономайзера Грина всегда в его газоходы засасывается воздух через отверстия для цепей, приводящих в движение скребки для очистки труб его от золы и т. п.

УДУНТ  
(ДИТ)

слагаемое  $Q_6$ , которое может входить как с положительным, так и с отрицательным, знаком и которое можно назвать невязкой от неустановившегося состояния котельной (результат переменного расхода пара, переменного процесса в топке и пр.).

Уравнение теплового баланса котельной установки в таком случае будет иметь вид:

$$Q_{т.} + Q_{пр.} = Q_1 + Q_1^B + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \pm Q_6 \quad (3)$$

В дальнейшем мы будем рассматривать только установившееся тепловое состояние, для которого  $Q_6 = 0$  и для которого, следовательно, имеет силу уравнение (1).<sup>1)</sup>

Главнейшим слагаемым левой части уравнений теплового баланса, представленной формулами (1) и (3) и обозначенной нами  $Q_{т.}$ , является рабочая теплопроизводительность топлива, обозначаемая в дальнейшем через  $Q_{раб.}$  кал/кг.

### ГЛАВА ТРЕТЬЯ.

## РАБОЧАЯ ТЕПЛОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ТОПЛИВА.

Под рабочей теплопроизводительностью топлива мы понимаем то количество тепла (выраженное в калориях),<sup>2)</sup> которое может выделить 1 кг топлива, сжигаемого в топке, считая, что оно полностью сгорело, а парообразные продукты сгорания утеряны в виде пара.

Наиболее надежные данные для рабочей теплопроизводительности топлива получаются путем пересчета чисел, полученных калориметрированием;<sup>3)</sup> возможно также подсчитать величину

<sup>1)</sup> В формуле (1) и (3) я сознательно выделяю слагаемое  $Q_1^B$  по обстоятельствам, о которых будет сказано ниже (см. 85 стр.).

<sup>2)</sup> Под калорией мы понимаем то количество тепла, которое способно нагреть один килограмм воды на один градус (от 14,5 до 15,5° С).

<sup>3)</sup> В нашу задачу не входит объяснять здесь, в чем именно заключается калориметрирование. Интересующихся деталями этого вопроса мы отсылаем к специальной литературе: в первую очередь к весьма интересной книге В. Ф. Лугинина «Описание различных методов определения теплот горения органических соединений», Москва, 1894 г., и к замечательной работе Д. И. Менделеева «Основы фабрично-заводской промышленности», С.-Петербург, 1897 г. Весьма обстоятельно этот вопрос изложен также в прекрасном руководстве проф. А. С. Ломшаква «Испытание паровых котлов», изд. 2-е, С.-Петербург, 1913 г.

НБ  
УДУНТ  
(ДНТ)

теплопроизводительности, если известен элементарный состав топлива.

Так, Дюлонг (Dulong) предложил теоретическую формулу, имеющую ныне лишь исторический интерес.

Если обозначим через  $Q_v$  высшую теплопроизводительность топлива в *кал/кг*,<sup>1)</sup> а содержание углерода, водорода и кислорода выразим в % от веса рабочего топлива соответственно через С, Н и О, то формула Дюлонга напишется в следующем виде:

$$Q_v = 81 \cdot C + 345 \cdot \left( H - \frac{O}{8} \right), \quad (4)$$

где первое слагаемое учитывает тепло, выделяемое при полном сгорании углерода, а второе слагаемое — тепло, выделяемое при полном сгорании водорода в воду, ибо 1 кг углерода при полном сгорании выделяет 8100 *кал.* тепла, а 1 кг водорода при полном сгорании в воду выделяет 34 460 *кал.* тепла.

Эта формула построена на том предположении, что отдельные элементы, входящие в состав топлива, сгорая, выделяют тепло так, как будто бы они находятся в топливе лишь в механическом соединении, при чем, однако, кислород предполагается связанным химически полностью с водородом. На самом же деле это не так. *Элементы, из которых состоит топливо, находятся в самых разнообразных химических сочетаниях внутри топлива.* Лучше всего это подтверждается, если наблюдать горение осиновых и березовых дров. Несмотря на почти тождественный химический элементарный состав этих топлив, горение осины совсем не похоже на горение березы.<sup>2)</sup> В то время как береза, сгорая, дает густое, весьма богатое углеводородами и сильно теплоизлучающее пламя, осина горит прозрачным, слегка синеватым пламенем, указывающим на наличие в ее летучих продуктах сгорания окиси углерода.

<sup>1)</sup> Различают высшую и низшую теплопроизводительность топлива. Под высшей теплопроизводительностью понимают все тепло топлива, которое может быть выделено при полном его сгорании и при условии, что водород сгорает в воду, а не в пар. Если из высшей теплопроизводительности топлива вычесть теплоту, потребную для испарения воды, то получим низшую теплопроизводительность топлива. Низшая теплопроизводительность рабочего топлива называется *рабочей теплопроизводительностью*.

<sup>2)</sup> См. проф. А. А. Надежин «Основные виды топлив России и их характеристика», Москва, 1925 г.

Очень многие авторы пробовали преобразовать формулу Дюлонга с тем, чтобы она давала результаты, наиболее сходящиеся с непосредственными данными, полученными калориметрированием, и из всех предложенных формул наиболее удачной следует признать эмпирическую формулу маститого русского химика Д. И. Менделеева:

$$Q_{\text{раб.}} = 81 \cdot C + 300 \cdot H - 26 \cdot (O - S) - 6 \cdot (9 \cdot H + W) \text{ кал/кг, (5)}$$

при чем

$$C + H + O + N + S + A + W = 100, \quad (6)$$

где

C —	содержание углерода	в рабочем топливе	в ‰ по весу
H —	водорода	»	»
O —	кислорода	»	
N —	азота		»
S —	серы		
A —	зола		
W —	влаги		

Весьма большим распространением среди техников пользуется формула Союза германских инженеров, которая при наших обозначениях напишется в следующем виде:

$$Q_{\text{раб.}} = 81 \cdot C + 290 \cdot \left( H - \frac{O}{8} \right) + 25 \cdot S - 6 \cdot W \quad (7)$$

В ней мы узнаем формулу Дюлонга с принятием во внимание тепла, развиваемого при сгорании серы, и потери тепла с водяными парами.

Специальными опытами установлено, что формула Союза германских инженеров является пригодной лишь для углей, в то время как для торфа, дров и нефти она дает уже числа, менее согласующиеся с полученными непосредственно калориметрированием. Формула же Д. И. Менделеева дает числа, более согласующиеся с данными, полученными путем непосредственного калориметрирования как для углей, так и для нефти, дров и торфа.<sup>1)</sup> Поэтому мы рекомендуем пользоваться во всех случаях именно

<sup>1)</sup> См. проф. А. С. Ломшаков «Испытание паровых котлов», С.-Петербург, 1913 г., стр. 25.

формулой Д. И. Менделеева, когда нельзя базироваться на данных непосредственного калориметрирования.

Пользуясь случаем, отмечу, что при подсчете по формуле Д. И. Менделеева нужно вводить в нее полное содержание серы в топливе; при выводе своей формулы великий химик сознательно упрощал ее, а подбирая свои коэффициенты на основании данных элементарного химического состава топлива и его теплопроизводительности, он вместе с тем учитывал и то обстоятельство, что сера, содержащаяся в топливе, не полностью сгорает при его использовании, ибо часть ее уже находится в соединении с другими элементами, составляющими топливо, и не всегда может быть использована.

Когда дан состав органической массы топлива и известно содержание балласта  $B = A + W + S$  (зола + влага + сера) в % в рабочем топливе, то теплопроизводительность  $Q_{\text{раб.}}$  может быть подсчитана по формуле:

$$Q_{\text{раб.}} = \frac{100 - B}{100} \cdot Q_{\text{орг.}}^{\text{н.}} + 26 \cdot S - 6 \cdot W, \quad (8)$$

где  $Q_{\text{орг.}}^{\text{н.}}$  — низшая теплопроизводительность органической массы топлива в *кал/кг*, определяемая по формуле Д. И. Менделеева:

$$Q_{\text{орг.}}^{\text{н.}} = 81 \cdot C_0 + 246 \cdot H_0 - 26 \cdot O_0 \text{ кал/кг}, \quad (9)$$

где:

$C_0$ —	содержание	углерода	в %	по	весу	органич. массы
$H_0$ —	»	водорода	»	»	»	»
$O_0$ —		кислорода				»
$N_0$ —		азота				»

При этом

$$C_0 + H_0 + O_0 + N_0 = 100 \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} C &= C_0 \cdot \frac{100 - B}{100} \\ H &= H_0 \cdot \frac{100 - B}{100} \\ O &= O_0 \cdot \frac{100 - B}{100} \\ N &= N_0 \cdot \frac{100 - B}{100} \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

где

$$B = A + W + S \quad (12)$$

НБ  
УДУНТ  
(ДНТ)

В тех случаях, когда химический анализ не дает отдельно содержания азота и кислорода, а дает их сумму, можно пользоваться при подсчетах следующими цифрами для содержания азота в органической массе (по весу в %).

ТАБЛИЦА 1.

Р о д т о п л и в а.	От — до.	Грубо среднее.
Мазут . .	—	0,05
Каменный уголь .	1 — 2,2	1,7
Антрацит . .	—	? <sup>1)</sup>
Торф .	1,1—2,55	1,5
Дрова .	0,7—1,3	1,0

В конце книги приводится составленная нами таблица элементарного состава русских топлив,<sup>2)</sup> которая может оказать некоторую пользу при подсчетах на практике.

Конечно, не надо забывать, что в настоящее время загрязнение топлива серой, золой и влагой может значительно отклоняться от цифр, приведенных в указанной таблице.<sup>3)</sup>

В виду значительного потребления в качестве горючего дров и торфа, теплопроизводительность которых зависит главным образом от влажности, небесполезно будет предложить для подсчетов нижеследующие формулы:

для дров сухопутной доставки:

$$Q_{\text{раб.}} = 4370 - 49,7 \cdot W \text{ кал/кг} . \quad (13)$$

для сплавных дров:

$$Q_{\text{раб.}} = 3870 - 44,5 \cdot W \text{ кал/кг}; \quad (14)$$

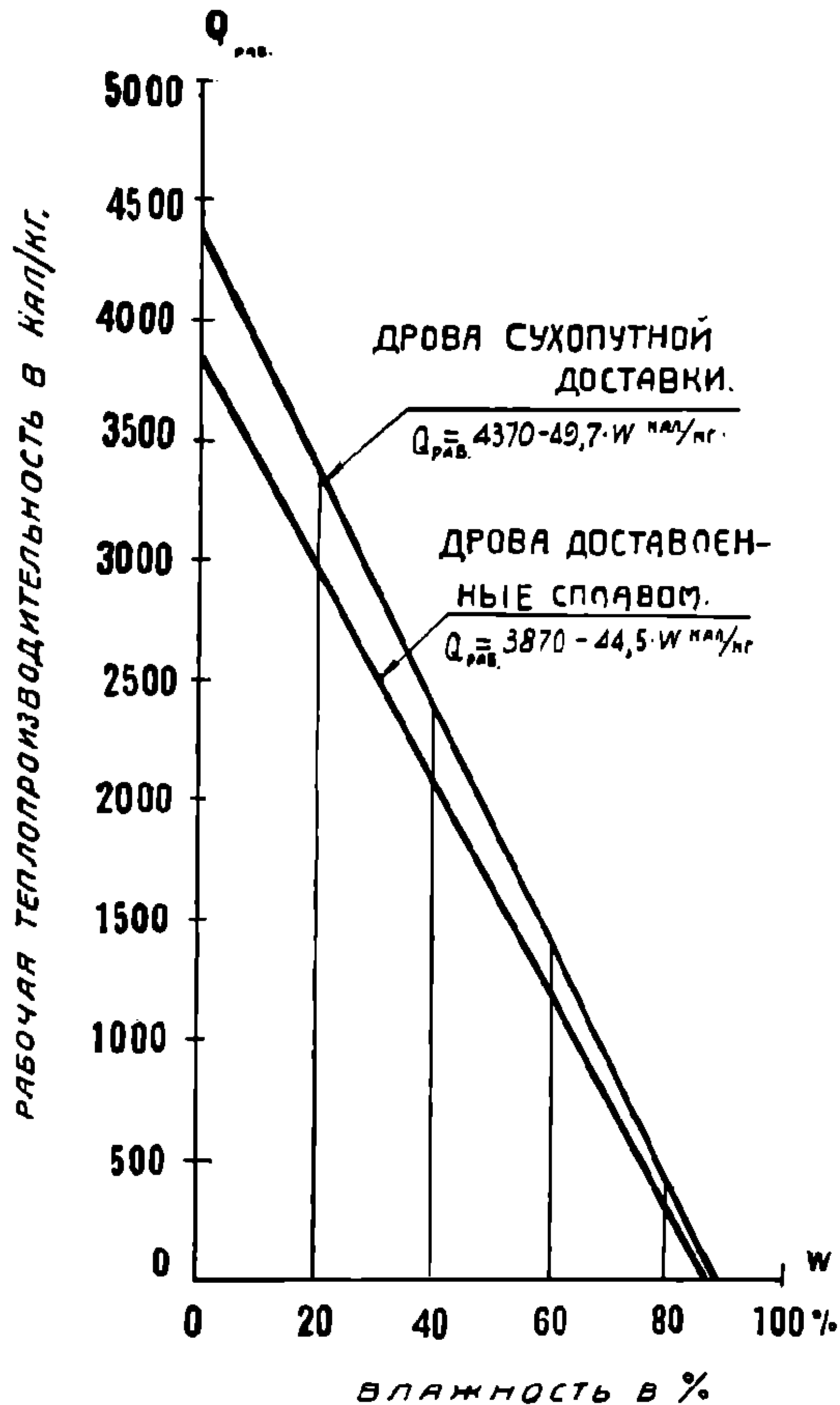
<sup>1)</sup> Данные отсутствуют. В виду малого содержания  $O_0 + N_0$  можно принять  $N_0$ , для упрощения, равным нулю.

<sup>2)</sup> См. 200 стр.

<sup>3)</sup> Нередки случаи, когда приходится сжигать дрова с влажностью 50%, торф с зольностью 10% и влажностью свыше 40%, донецкий антрацит с зольностью до 20%, мелочь подмосковного курного угля с общим содержанием балласта до 70% (из отвалов очевидно) и даже нефтяные остатки, которые весьма часто сжигаются с значительным содержанием воды, на что не так давно особенно сетовали железнодорожники.

для торфа (с теплопроизводительностью органической массы, 5200 кал/кг и зольностью сухого вещества 6<sup>0</sup>/<sub>0</sub>):

$$Q_{\text{раб.}} = 4888 - 54,9 \cdot W \text{ кал/кг}; \quad (15)$$



Фиг. 2. Рабочая теплопроизводительность дров в зависимости от влажности.

для торфа (с теплопроизводительностью органической массы, 4700 кал/кг и зольностью сухого вещества 6<sup>0</sup>/<sub>0</sub>):

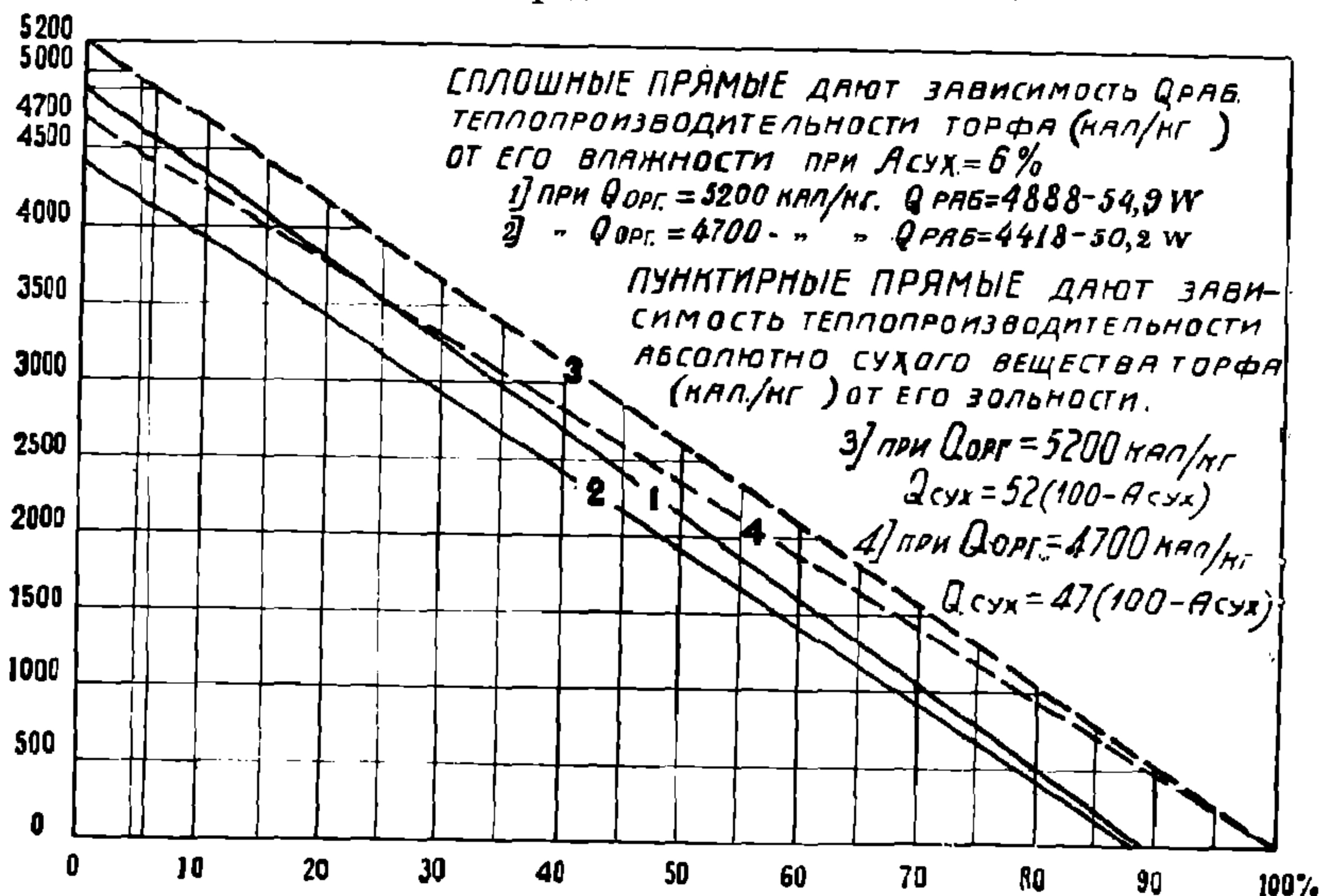
$$Q_{\text{раб.}} = 4418 - 50,2 \cdot W \text{ кал/кг} \quad (16)$$

Графическое изображение этих формул мы имеем для дров на фиг. 2 и для торфа на фиг. 3.



**Пример 1.** Для определения элементарного состава подмосковного курного угля, доставленного из Побединского района, была отобрана средняя проба и в герметически закрытых банках доставлена в химическую лабораторию. Последняя сообщила следующие цифры:

Воздушная влага .	. 14,51 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>
Гигроскопическая влага	. 19,88 »
Содержание серы	4,19 »
» золы	. 18,42 »
» углерода .	. 44,83 »
» водорода	3,66 »
» азота	0,76 »
» кислорода	8,26 »



Фиг. 3. Зависимость рабочей теплопроизводительности торфа от его влажности (при  $A_{сух} = 6\%$ ) и зависимость нижней теплопроизводительности абсолютно сухой массы торфа от его зольности.

Выход летучих (вместе с влагой), считая на воздушно-сухое топливо, 51,06%.

Требуется вычислить элементарный состав доставленного для анализа топлива и его рабочую теплопроизводительность.

**Решение.** Приведенный элементарный состав, определенный для топлива с содержанием влаги 19,88% (которая, строго говоря, даже не есть гигроскопическая влага, а представляет собой всю влагу, оставшуюся в топливе после предварительной его подсушки, во время которой было удалено влаги 14,51% веса рабочего топлива), нужно пересчитать на рабочее топливо.

Влажность  $W$  рабочего топлива определяется из следующего равенства:

$$W = 14,51 + 19,88 \cdot \frac{100 - 14,51}{100} = 31,505\%$$

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)

Содержание остальных составляющих топлива вычисляется на основании следующих соотношений:

Углерода	$C = 0,8549 \cdot 44,83 = 38,325$	или $38,33\%$
Водорода	$H = 0,8549 \cdot 3,66 = 3,129$	» $3,13$ »
Азота	$N = 0,8549 \cdot 0,76 = 0,650$	» $0,65$ »
Кислорода	$O = 0,8549 \cdot 8,26 = 7,061$	» $7,06$ »
Серы	$S = 0,8549 \cdot 4,19 = 3,582$	» $3,58$ »
Золы	$A = 0,8549 \cdot 18,42 = 15,747$	» $15,75$ »
Итого . . .		$= 68,494$ или $68,50\%$
Влаги $W$ . . .		$= 31,505$ » $31,50$ »
Всего . . . . .		$= 99,999$ или $100\%$

Множитель 0,8549 равен отношению веса топлива после воздушной сушки к весу топлива до воздушной сушки, то-есть:

$$0,8549 = \frac{100 - 14,51}{100}.$$

Тот же множитель получим, если будем исходить из общей формулы для пересчета процентного состава топлива одной влажности на другую влажность, для каковой цели служит следующая зависимость:

$$C_W = C_{W_1} \cdot \frac{100 - W}{100 - W_1}, \quad (17)$$

где  $C_W$  и  $C_{W_1}$  — содержание углерода в процентах по весу топлива при содержании в нем влаги соответственно  $W$  и  $W_1$  %.

В нашем случае

$$W = 31,505\% \text{ и } W_1 = 19,88\%;$$

следовательно искомый переводный множитель будет равен:

$$\frac{100 - W}{100 - W_1} = \frac{100 - 31,505}{100 - 19,88} = 0,8549.$$

Иным он получиться не может, ибо соотношение:

$$\frac{100 - W_2}{100} = \frac{100 - W}{100 - W_1}, \quad (18)$$

где  $W_2$ , в нашем случае воздушная влага  $= 14,51\%$ , есть тождество.

В самом деле, если  $W_1$  — гигроскопическая влага в % от веса топлива с гигроскопической влагой, а  $W_2$  — внешняя (или воздушная) влага в % от веса топлива с влажностью  $W$  % (полная влажность), то

$$W = W_2 + W_1 \cdot \frac{100 - W_2}{100}.$$

Подставляя  $W$  в формулу (18), получим:

$$\frac{100 - W_2}{100} = \frac{100 - \left( W_2 + W_1 \cdot \frac{100 - W_2}{100} \right)}{100 - W_1},$$

откуда

$$\begin{aligned} (100 - W_2) \cdot (100 - W_1) &= 100^2 - 100 \cdot W_2 - W_1(100 - W_2) \\ &= (100 - W_2) \cdot (100 - W_1). \end{aligned}$$

Определяем теперь теплопроизводительность рабочего топлива — низшую ( $Q_{\text{раб.}}$ ) и высшую ( $Q^{\text{в.}}$ ):

по формуле Д. И. Менделеева (5):

$$Q_{\text{раб.}} = 81 \cdot 38,325 + 300 \cdot 3,13 - 26 \cdot (7,06 - 3,58) - \\ - 6 \cdot (9 \cdot 3,13 + 31,505) = 3594,5 \text{ кал/кг};$$

$$Q^{\text{в.}} = 81 \cdot 38,325 + 300 \cdot 3,13 - 26 \cdot (7,06 - 3,58) = 3952,5 \text{ кал/кг};$$

по формуле Союза германских инженеров (7):

$$Q_{\text{раб.}} = 81 \cdot 38,325 + 290 \cdot \left(3,13 - \frac{7,06}{8}\right) + 25 \cdot 3,58 - 6 \cdot 31,505 = 3656,3 \text{ кал/кг};$$

по формуле Дюлонга (4):

$$Q^{\text{в.}} = 81 \cdot 38,325 + 345 \cdot \left(3,13 - \frac{7,06}{8}\right) = 3879,3 \text{ кал/кг};$$

$$Q_{\text{раб.}} = 81 \cdot 38,325 + 290 \cdot \left(3,13 - \frac{7,06}{8}\right) - 6 \cdot 31,505 = 3566,7 \text{ кал/кг}.$$

Здесь коэффициент 290 учитывает тепло, выделяемое при сгорании водорода в водяной пар.

*Пример 2.* Пользуясь данными химического анализа подмосковного угля, приведенными в примере 1, вычислить состав его органической массы и ее теплопроизводительность.

*Решение.* Воспользуемся формулами (12) и (11):

$$B = A + S + W = 18,42 + 4,19 + 19,88 = 42,49\%;$$

$$\frac{100 - B}{100} = \frac{100 - 42,49}{100} = 0,5751.$$

$$C_0 = 0,5751 \cdot 44,83 = 77,952 \text{ или } 77,95\%$$

$$H_0 = 0,5751 \cdot 3,66 = 6,364 \text{ » } 6,36 \text{ »}$$

$$O_0 = 0,5751 \cdot 8,26 = 14,362 \text{ » } 14,36 \text{ »}$$

$$N_0 = 0,5751 \cdot 0,76 = 1,321 \text{ » } 1,32 \text{ »}$$

$$\text{Итого . . } 99,999 \text{ или } 99,99\%$$

По формуле Д. И. Менделеева имеем:

$$Q_{\text{орг.}}^{\text{в.}} = 81 \cdot 77,952 + 300 \cdot 6,364 - 26 \cdot 14,362 = 7849,9, \text{ или } 7850 \text{ кал/кг}.$$

$$Q_{\text{орг.}}^{\text{н.}} = 7849,9 - 6 \cdot 9 \cdot 6,364 = 7506 \text{ кал/кг}$$

или по формуле (9):

$$Q_{\text{орг.}}^{\text{н.}} = 81 \cdot 77,952 + 246 \cdot 6,364 - 26 \cdot 14,362 = 7506 \text{ кал/кг}.$$

*Пример 3.* Пользуясь данными химического анализа подмосковного угля, приведенными в примере 1, вычислить состав абсолютно сухого вещества топлива (то-есть, определить состав безводного топлива) и его теплопроизводительность.

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)

*Решение.* Обозначив содержание углерода, водорода, кислорода, азота, серы и золы в процентах по весу абсолютно сухого топлива ( $W = \text{нулю}$ ) соответственно через  $C_{\text{сух.}}$ ,  $H_{\text{сух.}}$ ,  $O_{\text{сух.}}$ ,  $N_{\text{сух.}}$ ,  $S_{\text{сух.}}$  и  $A_{\text{сух.}}$ , получим:

$$C_{\text{сух.}} + H_{\text{сух.}} + O_{\text{сух.}} + N_{\text{сух.}} + S_{\text{сух.}} + A_{\text{сух.}} = 100. \quad (19)$$

$$\text{Переводный множитель} = \frac{100}{100 - 19,88} = \frac{100}{80,12}$$

$$C_{\text{сух.}} = \frac{100 \cdot 44,83}{80,12} = 55,953 \text{ или } 55,95\%$$

$$H_{\text{сух.}} = \frac{100 \cdot 3,66}{80,12} = 4,568 \quad 4,57 \text{ »}$$

$$O_{\text{сух.}} = \frac{100 \cdot 8,26}{80,12} = 10,309 \quad 10,31 \text{ »}$$

$$N_{\text{сух.}} = \frac{100 \cdot 0,76}{80,12} = 0,948 \quad 0,95 \text{ »}$$

$$S_{\text{сух.}} = \frac{100 \cdot 4,19}{80,12} = 5,229 \quad 5,23 \text{ »}$$

$$A_{\text{сух.}} = \frac{100 \cdot 18,42}{80,12} = 22,990 \quad 22,99 \text{ »}$$

$$\text{Итого.} \quad . \quad . \quad 99,997 \text{ или } 100\%$$

$$Q_{\text{сух.}}^{\text{в}} = 81 \cdot 55,95 + 300 \cdot 4,57 - 26 \cdot (10,31 - 5,23) = 5771 \text{ кал/кг};$$

$$Q_{\text{сух.}}^{\text{н}} = 5771 - 6 \cdot 9 \cdot 4,57 = 5524 \text{ кал/кг.}$$

Знание элементарного состава абсолютно сухого топлива [во многих случаях позволяет сделать весьма нужные наблюдения.

В частности, судить правильно о загрязненности топлива золою можно только по цифрам зольности, пересчитанным на абсолютно сухое топливо.

Теплопроизводительность (низшая) газообразного топлива может быть определена по следующей формуле:

$$Q^{\text{н}} = 30,6 \text{ CO} + 26,1 \text{ H}_2 + 86 \cdot \text{CH}_4 + 165 \cdot \text{C}_n\text{H}_m + 55,1 \text{ H}_2\text{S}, \quad (20)$$

где:

CO — содержание окиси углерода в % по объему;

H<sub>2</sub> — » водорода в % по объему;

CH<sub>4</sub> — » метана в % по объему;

C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> — » тяжелых углеводородов в % по объему;

H<sub>2</sub>S — сероводорода в % по объему;

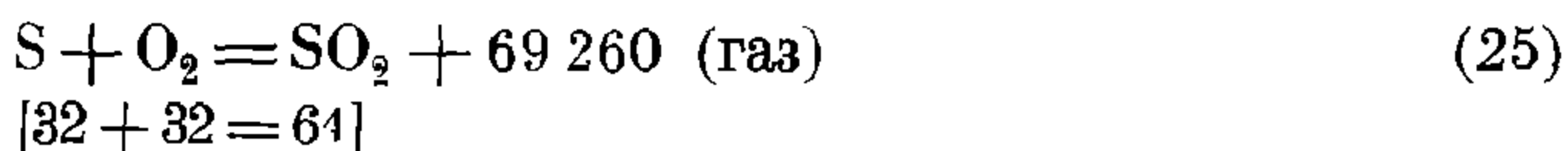
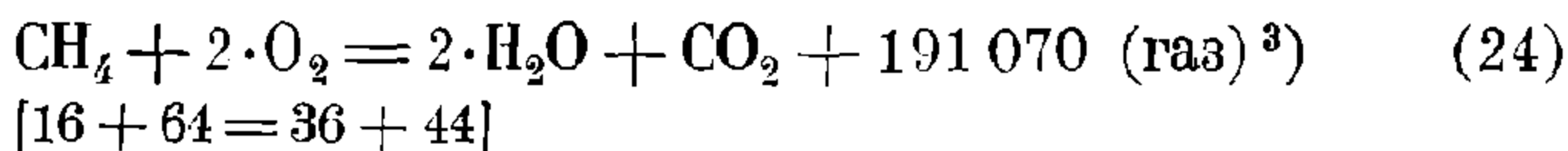
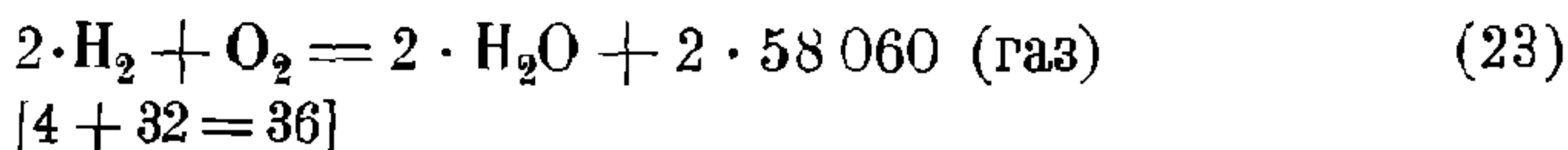
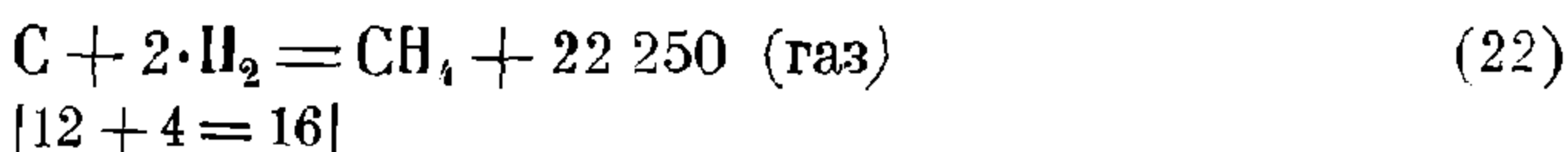
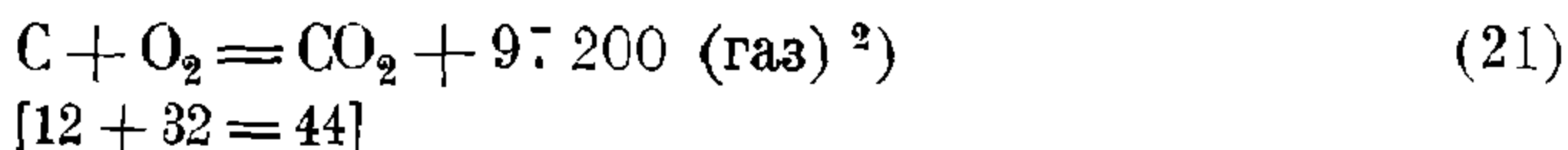
Q<sup>н</sup> — низшая теплопроизводительность 1 куб. м газа в калориях.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> См. таблицу III в приложении.

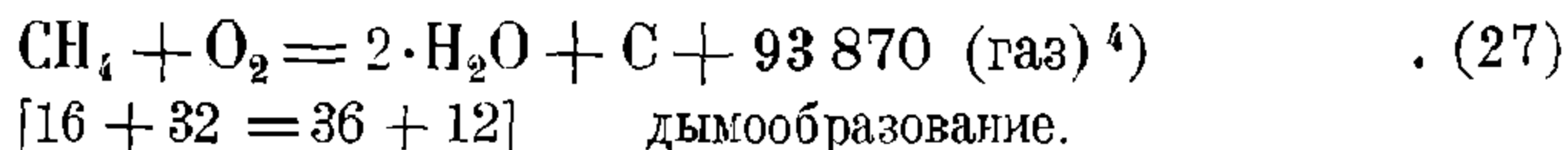
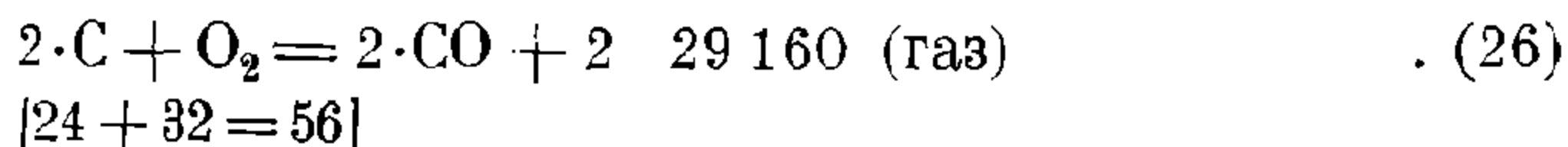
## ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ.

ОСНОВНЫЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ  
СГОРАНИЯ.

При полном сгорании топлива, использованного в топке,<sup>1)</sup> отметим следующие реакции:



При неполном сгорании кроме того должны быть отмечены следующие реакции:



Мы не считаем нужным здесь выписывать подробно всех реакций, которые протекают при сгорании топлива, ибо в конечном итоге нам безразлично, как получилась окись в продуктах сгорания, непосредственно ли при сгорании С в СО или после обуглероживания СО<sub>2</sub> — явление, хорошо известное при газогенераторном процессе и имеющее частично место в полугенераторных топках.

Обычно большинство авторов совершенно пренебрегает наличием в дымовых газах продуктов сгорания серы в топливе, но

<sup>1)</sup> За вычетом провалившегося в зольник и унесенного в газоходы (механическая неполнота сгорания).

<sup>2)</sup> 97 200 калорий есть тепло, выделяющееся при полном сгорании 12 кг углерода в двууглекислый газ (СО<sub>2</sub>) и называемое молекулярной теплотой реакции.

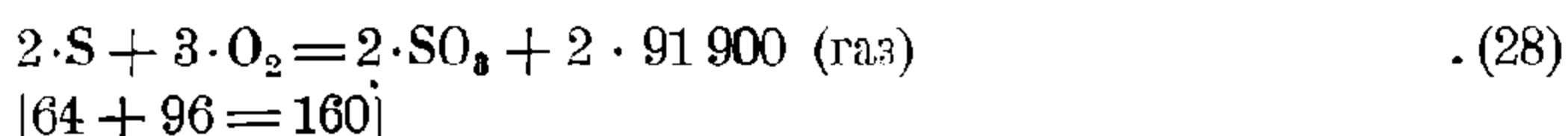
<sup>3)</sup> 191 070 = - 22 250 + 2 · 58 060 + 97 200 калорий.

<sup>4)</sup> 93 870 = - 22 250 + 2 · 58 060 калорий.

по некоторым соображениям, на которые справедливо указал проф. И. В. Арбатский, мы будем считаться с возможным присутствием в дымовых газах продуктов сгорания серы в виде сернистого газа  $\text{SO}_2$ .<sup>1)</sup>

Наблюдаемое иногда в дымовых газах, на ряду с окисью углерода, наличие углеводородов и даже дыма объясняется недостаточными размерами топочного пространства, а также неправильной конструкцией всей топки в целом. Поэтому при проектировании необходимо учитывать эти обстоятельства и стремиться создать топочное пространство надлежащей конструкции, чтобы помешать дымообразованию и вместе с тем избежать наличия в отходящих газах из топки продуктов неполного сгорания, как-то: водорода, окиси углерода, метана и других углеводородов.

Нелишне отметить здесь, что  $\text{SO}_2$ —сернистый газ не есть, собственно, продукт полного сгорания серы. Сгорание серы возможно также и по уравнению:



Поэтому, говоря о «полном» и «неполном» горении, мы имеем в виду главные элементы топлива: углерод и водород.

Обратим вновь наше внимание на термохимические уравнения и вспомним при этом о правиле Авогадро (Avogadro), что *в равных объемах газов как простых, так и сложных, при одинаковых температурах и давлениях, содержится одинаковое число молекул*, или, что то же: *молекулы всех газов при равных давлениях и температурах занимают равные объемы*.

Так как объем твердых тел ничтожно мал по сравнению с объемами кислорода, идущего на их сжигание, то на основании уравнений (21), (24) и (25) заключаем, что сгорание углерода, метана и серы в углекислый газ, водяной пар и в сернистый ангидрид происходит без сокращения объема, при условии, что водяной пар не сконденсировался в воду.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> И. В. Арбатский. «Формулы анализа топочных газов при присутствии в последних окиси углерода и сернистого газа».

<sup>2)</sup> В последнем случае сгорание метана по уравнению (24) будет происходить с сокращением объема в 3 раза: 1 молекула  $\text{CO}_2$  после сгорания вместо 1 молекулы  $\text{CH}_4$  и 2 молекулы  $\text{O}_2$  до сгорания, ибо объемом молекулы воды, в виду его ничтожной малости по сравнению с объемом газов, можно пренебречь.

На основании уравнений (23), (26), (27) и (22) заключаем, что сгорание углерода в окись углерода происходит с увеличением объема в два раза, сгорание метана в углекислый газ и в водяной пар идет без изменения объема, сгорание водорода в водяной пар — с уменьшением объема в  $1\frac{1}{2}$  раза и сгорание водорода и углерода в метан (по формуле 22) сопровождается сокращением объема в два раза. Эти соображения нам в дальнейшем пригодятся.

## ГЛАВА ПЯТАЯ.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИ НЕОБХОДИМОЕ КОЛИЧЕСТВО ВОЗДУХА.

Для полного сгорания 1 кг топлива данного состава теоретически требуется количество  $V_0$  куб. м сухого воздуха (при  $0^\circ\text{C}$  и 760 мм рт. столба), определяемое по следующей формуле:

$$V_0 = \left\{ \left[ \frac{8}{3} \cdot C + 8 \cdot \left( H - \frac{O}{8} \right) + S \right] : 100 \right\} \cdot \frac{1}{1,4286} \cdot \frac{100}{20,9} \quad (29)$$

Выражение, стоящее в квадратных скобках, дает нам количество килограммов кислорода, потребного, согласно основным формулам термохимии,<sup>1)</sup> для окисления 100 кг рабочего топлива при содержании в них  $C$  кг углерода,  $H$  кг водорода,  $S$  кг серы и  $O$  кг кислорода, ибо величины  $C$ ,  $H$ ,  $S$  и  $O$ , входящие в вышеупомянутую формулу, выражают содержание углерода, водорода, серы и кислорода в процентах веса рабочего топлива.

Следовательно, выражение, заключенное нами в фигурные скобки, дает количество килограммов кислорода, потребное для сжигания 1 кг топлива, указанного рабочего состава. Разделив величину, заключенную в фигурных скобках, на удельный вес кислорода при  $0^\circ\text{C}$  и 760 мм рт. ст. давления, равный  $1,4286 \text{ кг/м}^3$ , или, что то же, умножив на дробь  $\frac{1}{1,4286}$ , мы получаем объем кислорода в куб. метрах, теоретически необходимый для полного сгорания одного килограмма топлива.

Но так как в 100 куб. м сухого воздуха содержится 20,9 куб. м кислорода, то количество воздуха, теоретически потребного для сжигания 1 кг топлива, будет соответственно больше

<sup>1)</sup> См. формулы (21), (23) и (25) на 20 стр.

в отношении 100 к 20,9. Вот почему в формуле (29) и появился последний множитель  $\frac{100}{20,9}$ .

Обозначая через  $K_0$  количество килограммов кислорода, теоретически необходимое для полного окисления 1 кг топлива, элементарный состав коего известен в % по весу, будем иметь: <sup>1)</sup>

$$K_0 = 0,01 \cdot \left[ \frac{8}{3} \cdot C + 8 \cdot \left( H - \frac{O}{8} \right) + S \right] \quad (30)$$

или

$$K_0 = \frac{8}{300} \cdot \left[ C + 3 \cdot \left( H - \frac{O - S}{8} \right) \right] = 0,02667 \cdot \varepsilon, \quad (31)$$

где

$$\varepsilon = C + 3 \cdot \left( H - \frac{O - S}{8} \right). \quad (32)$$

Следовательно <sup>2)</sup>

$$V_0 = K_0 \cdot \frac{1}{1,4286} \cdot \frac{100}{20,9} = 3,349 \cdot K_0, \quad (33)$$

или <sup>3)</sup>

$$V_0 = 0,08932 \quad (34)$$

где  $V_0$  есть количество сухого воздуха в куб. метрах, приведенное к 0°C и 760 мм рт. ст.

Весовое же количество  $G_0$  сухого воздуха, теоретически необходимое для окисления 1 кг топлива, определяется по формуле:

$$G_0 = K_0 \cdot \frac{100}{23,1} = 4,329 K_0, \quad (35)$$

где множитель  $\frac{100}{23,1}$  есть отношение веса воздуха к весу кислорода, в нем заключенного;

или <sup>4)</sup>

$$G_0 = 0,1155 \cdot \varepsilon. \quad (36)$$

Совершенно очевидно, что

$$G_0 = 1,293 \cdot V_0, \quad (37)$$

где 1,293 — удельный вес сухого воздуха при температуре 0°C и давлении 760 мм рт. ст.

Проф. Д. И. Менделеев установил весьма простую зависимость между рабочей теплопроизводительностью топлива и тео-

<sup>1)</sup> См. выражение, стоящее в фигурных скобках в формуле (29).

<sup>2)</sup> Из формул (29) и (30).

<sup>3)</sup> Из формул (29) и (32).

<sup>4)</sup> Из формул (35) и (31).



ретически необходимым количеством воздуха для его полного сгорания, которая может быть выражена следующими формулами:

$$V_0 = \frac{Q_{\text{раб.}}}{900} = 1,1 \cdot \frac{Q_{\text{раб.}}}{1000} \quad (38)$$

$$G_0 = \frac{Q_{\text{раб.}}}{714} = 1,4 \cdot \frac{Q_{\text{раб.}}}{1000} \quad (39)$$

Проф. А. С. Ломшаков проверил эти соотношения, и на основании его данных можно считать, что отношение рабочей теплопроизводительности к теоретически необходимому для сгорания 1 кг топлива количеству воздуха  $\left[ \frac{Q_{\text{раб.}}}{V_0} \right]$  численно равно:

Для углей	902	}	. (40)
» нефти . . . .	901		
» дерева	895		
торфа .	880		

До сих пор мы все время говорили о сухом воздухе. Обычно же поступающий в топку воздух не является сухим; он несет с собой влагу в виде водяных паров, всегда в воздухе находящихся.

Количество водяных паров, находящихся в воздухе, легко вычисляется или по психрометру, помощью которого определяется относительная влажность воздуха, или, еще проще, по гигрометру, помощью которого определяется температура, соответствующая точке росы.

Зная последнюю температуру, мы можем определить вес водяных паров, заключенных в 1 куб. м воздуха.

Будучи выражен в граммах, он (вес водяных паров) численно окажется равным удельному весу сухого насыщенного пара соответствующей температуры, выраженному в  $г/м^3$ , который находится по таблицам IV или V для насыщенного пара (см. стр. 204—205).

Если же была определена по психрометру относительная влажность  $\omega$  в %, то абсолютная влажность определится по формуле:

$$f = \frac{\omega}{100} \cdot F, \quad (41)$$

где  $f$  — содержание водяных паров (граммы) в одном куб. метре влажного воздуха, а  $F$  — то количество водяных паров (в граммах), которое должно бы содержаться в одном куб. метре воздуха, чтобы сделать его насыщенным парами при данной температуре.

Зная по психрометру относительную влажность  $\omega$  в % и температуру воздуха  $t^\circ\text{C}$ , мы имеем все данные для определения абсолютной влажности воздуха.

*Пример 4.* Поступающий в топку воздух имеет температуру  $30^\circ\text{C}$  и относительную влажность  $50\%$ . Определить количество влаги, вносимое в топку с 1 куб. м воздуха.

*Решение.* По таблице  $V^1)$  находим, при температуре  $30^\circ\text{C}$  удельный вес  $\gamma = 30,4 \text{ г/м}^3$ , который в то же время будет численно равен весу водяных паров, заключенных в 1  $\text{м}^3$  воздуха, имеющего температуру  $30^\circ\text{C}$  при полном насыщении его водяными парами.

Подставляя  $\omega = 50 \%$  и  $F = 30,4 \text{ г/м}^3$  в формулу (41), получим:

$$f = \frac{50}{100} \cdot 30,4 = 15,2 \text{ г/м}^3.$$

В то время как состав сухого воздуха весьма постоянен, влажность воздуха, поступающего в топку, сильно переменна, ибо средняя относительная влажность воздуха колеблется в очень широких пределах — от 30 до  $90\%$ , в зависимости от места, времени года, состояния погоды и прочих обстоятельств. В частности, в жилых помещениях, например, рекомендуется поддерживать относительную влажность около  $50\%$ , как наиболее благоприятную для человеческого организма.

Обозначив через:

$\gamma'_{\text{св.}}$  — вес (кг) сухого воздуха, заключенного в 1 куб. метре смеси;

$\gamma'_{\text{вл.}}$  — вес (кг) водяных паров, заключенных в 1 куб. метре смеси;

$\gamma$  — полный вес (кг) 1 куб. метра смеси;

$\omega$  — относительную влажность воздуха в %;

$t$  — температуру смеси ( $^\circ\text{C}$ );

$F$  — количество водяных паров (г), заключенных в 1 куб. метре смеси при полном ее насыщении ( $\omega = 100\%$ ) и данной температуре ( $t^\circ\text{C}$ );

$f$  — абсолютную влажность воздуха, т.-е. количество граммов водяных паров, заключенных в 1 куб. метре смеси при данных условиях;

$P_{\text{б.}}$  — барометрическое давление (в мм рт. ст.);

$P_{\text{впс.}}$  — давление водяных паров (в мм рт. ст.) в смеси;

<sup>1)</sup> См. в приложении, стр. 205.

$P_{\text{вл.}}$  — давление водяных паров (в мм рт. ст.), соответствующее полному насыщению воздуха при данной температуре  $t^\circ \text{C}$ ;  
 1,293 — вес (кг) 1 куб. м сухого воздуха при  $0^\circ \text{C}$  и 760 мм рт. ст.;  
 273 — абсолютная температура при  $0^\circ \text{C}$ ,  
 будем иметь:

$$P_{\text{влс.}} = \frac{\omega}{100} \cdot P_{\text{вл.}}; \quad (42)$$

$$\gamma'_{\text{св.}} = 1,293 \cdot \frac{P_{\text{б.}} - P_{\text{влс.}}}{760} \cdot \frac{273}{273 + t} = 0,4645 \cdot \frac{P_{\text{б.}} - P_{\text{влс.}}}{273 + t} \text{ кг/м}^3; \quad (43)$$

$$f = \frac{\omega}{100} \cdot F; \quad (41)$$

$$\gamma'_{\text{вл.}} = 0,001 \cdot f; \quad (44)$$

$$\gamma = \gamma'_{\text{св.}} + \gamma'_{\text{вл.}} \quad (45)$$

$$\gamma = 1,293 \cdot \frac{P_{\text{б.}} - P_{\text{влс.}}}{760} \cdot \frac{273}{273 + t} + 0,001 \cdot f, \quad (46)$$

при чем  $P_{\text{вл.}}$  — давление водяного пара — находится по тем же таблицам (IV и V), пользуясь которыми мы находим  $F$  — количество водяных паров, заключенных в 1 куб. м смеси при ее полном насыщении.

Следовательно на 1 кг сухого воздуха приходится водяных паров:

$$\frac{\gamma'_{\text{вл.}}}{\gamma'_{\text{св.}}} = \psi \text{ кг} \quad (47)$$

Подставляя  $\gamma'_{\text{вл.}}$  и  $\gamma'_{\text{св.}}$  из формул (43) и (41), находим:

$$\psi = \frac{0,001 \cdot f \cdot 760 \cdot (273 + t)}{1,293 \cdot (P_{\text{б.}} - P_{\text{влс.}}) \cdot 273} = 0,002153 \cdot \frac{f \cdot (273 + t)}{P_{\text{б.}} - P_{\text{влс.}}} \quad (48)$$

Зная теоретически необходимое количество воздуха  $G_0$  кг, необходимое для полного сгорания 1 кг топлива данного состава, которое подсчитывается по формулам (35) или (36), легко определить и количество воздуха при данной его влажности по следующей, само собой очевидной, формуле:

$$G = \frac{\gamma'_{\text{св.}} + \gamma'_{\text{вл.}}}{\gamma'_{\text{св.}}} \cdot G_0 = \frac{\gamma}{\gamma'_{\text{св.}}} \cdot G_0, \quad (49)$$

или

$$G = \left( 1 + \frac{\gamma'_{\text{вл.}}}{\gamma'_{\text{св.}}} \right) \cdot G_0 = (1 + \psi) \cdot G_0 \quad (50)$$

Если мы будем пренебрегать величиной  $\gamma'_{\text{вл.}}$ , принимая ее равной нулю, что обычно до сих пор было общепринятым, то

УДМУНТ  
(ДНТ)

ошибка при подаче в топку воздуха, вполне насыщенного водяными парами, при температуре его  $30^{\circ}\text{C}$ , выразится цифрой, равной

$$100 = \frac{\gamma'_{\text{вп.}}}{\gamma'_{\text{св.}}} \cdot 100 = \frac{0,0304}{1,118} \cdot 100 = 2,72\% \text{ от веса сухого воздуха,}$$

или

$$\frac{\gamma'_{\text{вп.}}}{\gamma'_{\text{св.}} + \gamma'_{\text{вп.}}} \cdot 100 = \frac{0,0304}{1,148} \cdot 100 = 2,65\% \text{ от веса смеси.}$$

**Пример 5.** Требуется определить теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания 1 кг подмосковного курного угля следующего состава:

Углерода .	38,33%
Водорода	3,13 »
Кислорода	7,06 »
Азота	0,65 »
Серы	3,58 »
Золы	15,75 »
Влаги	31,50 »

Теплопроизводительность по бомбе 3969 кал/кг.

**Решение.** Количество потребного кислорода находится по формуле (30):

$$K_0 = 0,01 \left[ \frac{8}{3} \cdot 38,33 + 8 \left( 3,13 - \frac{7,06}{8} \right) + 3,58 \right] = 1,238 \text{ кг.}$$

Количество же потребного сухого воздуха, по формулам (33) и (35):

$$\begin{aligned} V_0 &= 3,349 \cdot 1,238 = 4,145 \text{ куб. м,} \\ G_0 &= 4,329 \cdot 1,238 = 5,359 \text{ кг} \end{aligned}$$

или по формуле (37):

$$G_0 = 1,293 \cdot 4,145 = 5,359 \text{ кг.}$$

По приближенным формулам Д. И. Менделеева получим (см. 38 и 39):

$$V_0 = \frac{3969 - 6 \cdot (9 \cdot 3,13 + 31,50)}{900} = 4,012 \text{ куб. м,}$$

$$G_0 = \frac{3969 - 6 \cdot (9 \cdot 3,13 + 31,50)}{714} = 5,057 \text{ кг,}$$

где числитель  $= 3969 - 6 \cdot (9 \cdot 3,13 + 31,50) = Q_{\text{раб.}}$ , ибо, когда указывается теплопроизводительность по бомбе без оговорок, то обычно понимается высшая (ср. пример 1).

**Пример 6.** Определить ошибку, совершенную при подсчете в случае пренебрежения влажностью воздуха, если последний подавался в топку, имея при температуре  $30^{\circ}\text{C}$  относительную влажность  $50\%$ . Барометрическое давление 740 мм рт. столба.

УДУНТ  
(ДИТ)

*Решение.* В данном случае  $f = 15,2 \text{ г/м}^3$  (см. пример 4, стр. 25).  
По таблице  $V$  находим:

$$P_{\text{вл.}} = 31,8 \text{ мм рт. столба.}$$

По формуле (42):

$$P_{\text{влс.}} = \frac{50}{100} \cdot 31,8 = 15,9 \text{ мм рт. столба.}$$

По формуле (48):

$$\psi = 0,002153 \frac{15,2 \cdot (273 + 30)}{740 - 15,9} = 0,01369.$$

По формуле (50):

$$G = (1 + 0,0137) \cdot G_0 = 1,0137 G_0,$$

что дает ошибку 1,37% от веса сухого воздуха или 1,36% от веса влажного воздуха.

## ГЛАВА ШЕСТАЯ.

### КОЭФФИЦИЕНТ ИЗБЫТКА ВОЗДУХА В ТОПКЕ.

Практически для сжигания 1 кг топлива обычно расходуется воздуха больше, чем то требуется на основании теоретического расчета. Объясняется это целым рядом обстоятельств, с которыми приходится сталкиваться в практических условиях сжигания топлива. Совершенно устранить избыток воздуха против теоретически необходимого не представляется возможным, да и не всегда бывает в этом необходимость.

Обозначим через  $V_\alpha$  объем воздуха (в  $\text{м}^3$  при  $0^\circ \text{С}$  и 760 мм рт. ст.), фактически поступившего в топку и отнесенного к одному килограмму топлива, а через  $G_\alpha$  — его вес. Тогда отношение:

$$\frac{V_\alpha}{V_0} = \frac{G_\alpha}{G_0} = \alpha_{\text{т.}}, \quad (51)$$

обычно большее единицы, будет называться коэффициентом избытка воздуха.

Величина этого коэффициента в топке ( $\alpha_{\text{т.}}$ ) зависит от конструкции топки, размеров топочного пространства, расположения поверхности нагрева относительно топки, от характера самого топлива, от внимательности работы кочегара и т. д.

При правильно спроектированной топке и хорошей эксплуатации можно принимать следующие величины  $\alpha_{\text{т.}}$ :

УДКУНБ  
УДУНТ  
(ДНТ)

ТАБЛИЦА 2.

Нефтяное топливо . . .	1,2—1,3
Газовое или пылевидное топливо	1,1—1,2
Шахтные топки для дров и торфа . .	1,2—1,3
Ступенчатые и наклонные решетки . .	1,4—1,6
Ручная топка для антрацита . . .	1,3—1,4
Ручная топка для пламенного топлива (при наличии вторичного впуска воздуха) . .	1,5—1,7
Ручная топка для пламенного топлива (при конструкции топки без вторичного впуска воздуха) . .	1,7—1,9
Механическая топка с верхним забросом . .	1,4—1,6
Механическая топка с подвижной решеткой и нижней подачей топлива . .	1,3—1,5

Цифры  $\alpha_t$  приведены при нормальных напряжениях котла.<sup>1)</sup>

При уменьшении напряжения котла коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_t$  увеличивается на 0,05 — 0,10, при увеличении напряжения котла — соответственно уменьшается на 0,05 — 0,10.

*Пример 7* Часовой расход подмосковного курного угля с содержанием:

углерода . . .	. 38,33%
водорода . . .	3,13 »
кислорода . . .	7,06 »
азота . . .	0,65 »
серы . . .	3,58 »
зола . . .	. 15,75 »
влаги . . .	. 31,50 »

составляет 2 тонны. Определить объем воздуха, подаваемого вентиляторами в топку для сжигания указанного количества топлива, если известен избыток воздуха в топке, равный 40% от теоретически необходимого, температура воздуха 30° С и его относительная влажность 50%. Барометрическое давление равно 740 мм рт. ст.

*Решение.* Определяем вес сухого воздуха, теоретически необходимого для полного сгорания так же, как в примере 5, где мы нашли:

$$G_0 = 5,359 \text{ кг.}$$

Вводим поправку, вычисленную нами для нашего случая в примере 6, и получаем:

$$G_0 = 1,0137 \cdot 5,359 = 5,432 \text{ кг.}$$

<sup>1)</sup> См. таблицу на стр. 136.

Абсолютная влажность  $f = 15,2 \text{ г/м}^3$  была определена для нашего случая в примере 4; следовательно по формуле (44) находим:

$$\gamma'_{\text{вл.}} = 0,001 \cdot 15,2 = 0,0152 \text{ кг/м}^3$$

или ту же величину можно найти и на основании общеизвестной формулы:

$$\gamma'_{\text{вл.}} = \frac{0,8043 \cdot 273}{(273 + t)} \frac{P_{\text{впс.}}}{760} = 0,2889 \cdot \frac{P_{\text{впс.}}}{(273 + t)}, \quad (52)$$

где 0,8043 — удельный вес пара, отнесенный условно к  $0^\circ \text{С}$  и 760 мм рт. ст. (см. таблицу II в приложении).

В нашем случае  $P_{\text{впс.}} = 15,9 \text{ мм рт. ст.}$  было найдено в примере 6; следовательно,

$$\gamma'_{\text{вл.}} = 0,2889 \cdot \frac{15,9}{(273 + 30)} = 0,0152 \text{ кг/м}^3.$$

Далее, по формуле (42) имеем:

$$\gamma'_{\text{св.}} = 0,4645 \cdot \frac{740 - 15,9}{273 + 30} = 1,1094 \text{ кг/м}^3$$

и по формуле (45) удельный вес смеси будет равен:

$$\gamma = 0,0152 + 1,1094 = 1,1246 \text{ кг/м}^3.$$

Разделив вес влажного воздуха на его удельный вес, при заданных давлении и температуре, найдем (при  $\alpha_{\text{т.}} = 1$ ):

$$V_{30; 740} = \frac{5,432}{1,1246} = 4,83 \text{ м}^3$$

на один кг сожженного топлива, что при избытке воздуха в 40% и расходе топлива в 2 тонны в час дает:

$$V_{1,4; 30; 740} = 1,4 \cdot 4,83 \cdot 2000 = 135\,240 \text{ м}^3/\text{час},$$

или:

$$\frac{135\,240}{60} = 2254 \text{ м}^3 \text{ в минуту.}$$

## ГЛАВА СЕДЬМАЯ.

### СОСТАВ И НАИМЕНЬШЕЕ КОЛИЧЕСТВО ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ОДНОГО КИЛОГРАММА ТОПЛИВА.

Минимальное количество продуктов полного сгорания топлива за счет окисления его кислородом воздуха мыслимо только при теоретическом расходе сухого воздуха.

Подсчет количества продуктов сгорания и определение их состава могут быть сделаны, если известен элементарный состав

УДКУНТ  
(ДИТ)

топлива, выражаемый обычно в процентах по весу рабочего топлива.

Пользуясь ранее установленным обозначением, будем иметь, на основании термохимических формул (см. IV главу), следующую таблицу.

ТАБЛИЦА 3.

*Состав и количество продуктов полного сгорания 1 кг топлива при теоретически минимальном расходе сухого воздуха.*

Наименование	Вес в килограммах	При 0° С и 760 мм рт. ст.		
		Удельный вес кг/м <sup>3</sup>	Объем в куб. м	
Углекислый газ .	CO <sub>2</sub>	$\frac{44}{12} \cdot \frac{C}{100} =$ $= 3,667 \frac{C}{100}$	1,9643	$\frac{3,667}{1,964} \cdot \frac{C}{100} =$ $= 1,867 \cdot \frac{C}{100}$
Сернистый газ .	SO <sub>2</sub>	$\frac{64}{32} \cdot \frac{S}{100} =$ $= 2 \frac{S}{100}$	2,8602	$\frac{2}{2,86} \frac{S}{100} =$ $= 0,6993 \cdot \frac{S}{100}$
Азот <sup>1)</sup> .	N <sub>2</sub>	$0,769 G_0 + \frac{N}{100} =$ $= 3,329 \cdot K_0 + \frac{N}{100}$	1,2572 <sup>2)</sup>	$\frac{0,769 \cdot G_0 + \frac{N}{100}}{1,257} =$ $= 2,6479 \cdot K_0 +$ $+ 0,7954 \cdot \frac{N}{100}$
Водяной пар .	H <sub>2</sub> O	$\frac{9 \cdot H + W}{100}$	0,8043	$\frac{9 \cdot H + W}{100 \cdot 0,8043} =$ $= \frac{9 \cdot H + W}{80,43}$

<sup>1)</sup> Здесь сознательно делается разница в обозначениях для азота и кислорода, находящихся как в топливе, так и в воздухе, а, следовательно, и в продуктах сгорания. Содержание кислорода и азота в рабочем топливе мы будем обозначать через O и N, а содержание их в дымовых газах через O<sub>2</sub> и N<sub>2</sub>. Это мы условимся делать и впредь во избежание путаницы.

<sup>2)</sup> Для азота взят удельный вес, равный 1,2572 кг/м<sup>3</sup>, как для азота воздуха, так называемого «атмосферного азота».



Если воздух будет влажным, то увеличится лишь содержание водяных паров. При относительной влажности воздуха  $\omega$  % количество водяных паров, приходящихся на 1 кг сухого воздуха, определяется по формуле (48), в которой оно обозначено через  $\psi$ .

Следовательно, вес водяных паров (в кг) при полном сгорании топлива в теоретически минимальном количестве воздуха с относительной влажностью  $\omega$  %, соответствующей содержанию  $\psi$  кг водяных паров на 1 кг сухого воздуха, определится как сумма

$$\frac{9 \cdot H + W}{100} + \psi \cdot G_0, \quad (53)$$

где  $G_0$  — вес теоретически минимального расхода сухого воздуха, определяемый по следующей формуле:

$$G_0 = 0,1155 \cdot \left[ C + 3 \cdot \left( H - \frac{O - S}{8} \right) \right]^1) \quad (54)$$

Объем водяных паров (при  $0^\circ \text{C}$  и 760 мм рт. ст.) в продуктах сгорания 1 кг топлива, при теоретически минимальном расходе воздуха с содержанием  $\psi$  кг водяного пара на 1 кг сухого воздуха, определяется по формуле:

$$\frac{0,01 (9 \cdot H + W) + \psi \cdot G_0}{0,8043} \quad (55)$$

На основании только-что рассмотренных данных вычисляется также весьма легко процентный состав продуктов сгорания, но в виду того, что при химическом анализе дымовых газов водяные пары, в них заключенные, предварительно конденсируются, состав продуктов сгорания принято давать в процентах по объему сухих газов.

Обозначим процентный объемный состав сухих продуктов сгорания соответственно через:

$\text{CO}_2$  — содержание углекислого газа;  
 $\text{SO}_2$  — сернистого ангидрида;  
 $\text{N}_2$  — » азота.

<sup>1)</sup> Получена из формулы (36) и (32); см. также формулы (35) и (30).

Тогда в нашем случае полного сгорания топлива при теоретически минимальном количестве воздуха (сухого или влажного — безразлично) <sup>1)</sup> мы будем иметь равенство:

$$\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{N}_2 = 100 . \quad (56)$$

*Пример 8.* Требуется определить состав и количество дымовых газов при полном сгорании 1 кг подмосковного угля с следующим содержанием (в % по весу):

углерода	. . 38,33
водорода	3,13
кислорода	7,06
азота	0,65
серы . .	3,58
зола .	. 15,75
влаги	. 31,50

при условии, что сгорание происходит с теоретически минимальным количеством воздуха, имеющего при температуре 30° С относительную влажность 50%.

*Решение.* Согласно табл. 3 (см. стр. 31), имеем:

ТАБЛИЦА 4.

С о с т а в	Вес в килограммах	В % по весу	
		влажных газов	сухих газов
Углекислый газ . .	$3,667 \cdot \frac{38,33}{100} = 1,4055$	22,40	25,07
Сернистый ангидрид . .	$2 \cdot \frac{3,58}{100} = 0,0716$	1,14	1,27
Азот	$3,329 \cdot 1,238^2) + \frac{0,65}{100} = 4,1278$	65,78	73,66
Водяные пары	$\frac{9 \cdot 3,13 + 31,5}{100} + 0,0137 \cdot 5,359 = 0,6701^3)$	10,68	—
	Итого	100,00	100,00

<sup>1)</sup> Если бы потребовалось для каких-либо целей знать процентный состав влажных дымовых газов, то их состав будет, конечно, уже различным при сгорании топлива в сухом воздухе и при сгорании топлива во влажном воздухе, за счет наличия в последнем случае в дымовых газах также и влаги, внесенной с воздухом (см. формулу 55).

<sup>2)</sup> См. пример 5 (стр. 27).

<sup>3)</sup> См. формулу 53 и примеры 6 (стр. 28) и 5 (стр. 27).

ТАБЛИЦА 5.

С о с т а в	Объем в куб. метрах	В % по объему	
		влажных газов	сухих газов
Углекислый газ .	$1,867 \cdot \frac{38,33}{100} = 0,7156$	14,74	17,78
Сернистый газ .	$0,6993 \cdot \frac{3,58}{100} = 0,0250$	0,51	0,62
Азот .	$2,6479 \cdot 1,238 + 0,7954 \cdot \frac{0,65}{100} = 3,2833$	67,60	81,60
Водяные пары .	$\frac{0,01 \cdot (9 \cdot 3,13 + 31,5) + 0,0137 \cdot 5,359}{0,8043} = 0,8331^1)$	17,15	—
	Итого .	100,00	100,00

## ГЛАВА ВОСЬМАЯ.

СОСТАВ И КОЛИЧЕСТВО ПРОДУКТОВ ПОЛНОГО СГОРАНИЯ ОДНОГО КИЛОГРАММА ТОПЛИВА, С КОЭФФИЦИЕНТОМ ИЗБЫТКА ВОЗДУХА  $\alpha > 1$ .

При сжигании топлива в практических условиях почти нет возможности добиться полного сгорания топлива в теоретически необходимом количестве воздуха.

Допустим, мы имеем полное сгорание топлива, но при этом расходует воздуха больше теоретически необходимого <sup>2)</sup> в  $\alpha$  раз, т.-е. работаем с коэффициентом избытка воздуха, равным  $\alpha$ .<sup>3)</sup>

Этот случай полного сгорания отличается от рассмотренного нами (в главе VII) полного сгорания при теоретически минимальном расходе воздуха только тем, что продукты сгорания топлива будут содержать также и введенные с избыточным воздухом следующие количества его составных частей (в килограммах):

к и с л о р о д а (избыточного)

$$(\alpha - 1) \cdot K_0 = (\alpha - 1) \cdot 0,02667 \cdot \epsilon;$$

<sup>1)</sup> См. формулу 55 и примеры 6 (стр. 28) и 5 (стр. 27).

<sup>2)</sup> См. главу V.

<sup>3)</sup> См. формулу 51, глава VI.

азота (избыточного)

$$0,769 \cdot (\alpha - 1) \cdot G_0 = 0,769 \cdot 4,329 \cdot (\alpha - 1) \cdot K_0 = \frac{76,9}{23,1} \cdot (\alpha - 1) \cdot K_0 = \\ = 3,329 \cdot (\alpha - 1) \cdot K_0 = 0,08878 \cdot (\alpha - 1) \cdot \epsilon;$$

водяных паров, введенных с избыточным воздухом,

$$(\alpha - 1) \cdot \psi \cdot G_0 = (\alpha - 1) \cdot \psi \cdot 4,329 \cdot K_0 = (\alpha - 1) \cdot \psi \cdot 0,1154 \cdot \epsilon.$$

В следующей таблице сведены все формулы для подсчета в данном случае состава и количества дымовых газов.

ТАБЛИЦА 6.

*Состав и количество продуктов полного сгорания 1 кг топлива при расходе воздуха с коэффициентом избытка  $\alpha$ .*

Наименование	Вес в килограммах	При 0°С и 760 мм рт. ст.		
		Удельный вес кг/м <sup>3</sup>	Объем в куб. м	
Углекислый газ .	CO <sub>2</sub>	$3,667 \cdot \frac{C}{100}$	$1,9643$	$1,867 \cdot \frac{C}{100}$
Сернистый ангидрид .	SO <sub>2</sub>	$2 \cdot \frac{S}{100}$	$2,8602$	$0,6993 \cdot \frac{S}{100}$
Кислород .	O <sub>2</sub>	$(\alpha - 1) \cdot K_0$	$1,4285$	$0,7 \cdot (\alpha - 1) \cdot K_0$
Азот .	N <sub>2</sub>	$3,329 \cdot \alpha \cdot K_0 + \frac{N}{100}$	$1,2572$	$2,6479 \cdot \alpha \cdot K_0 + \\ + 0,7954 \cdot \frac{N}{100}$
Водяные пары .	H <sub>2</sub> O	$\frac{9 \cdot H + W}{100} + \\ + 4,329 \cdot \alpha \cdot \psi \cdot K_0$	$0,8043$	$\frac{9 \cdot H + W}{80,43} + \\ + 5,3823 \cdot \alpha \cdot \psi \cdot K_0$

Обозначая через:

- CO<sub>2</sub> — содержание углекислого газа,
- SO<sub>2</sub> — » сернистого ангидрида,
- O<sub>2</sub> — кислорода,
- N<sub>2</sub> — » азота,

в % по объему сухих газов, в этом случае получим очевидное равенство:

$$CO_2 + SO_2 + O_2 + N_2 = 100 \tag{57}$$

Определим количество  $x$  куб. м кислорода, которое нужно израсходовать, чтобы получить 100 куб. м сухого газа указан-

УДАЛИТЬ  
(ДИТ)

ного состава при данном топливе, которого потребуется для этого сжечь некоторое количество  $y$  кг.

На основании сказанного в главе IV, на 20 стр., мы уже знаем, что для получения  $\text{CO}_2$  куб. м углекислого газа нужно израсходовать такое же количество <sup>1)</sup> куб. м кислорода, которое весит  $\frac{8}{3} \cdot \frac{C}{100} \cdot y$  кг; точно также для получения  $\text{SO}_2$  куб. м сернистого ангидрида нужно столько же, т.-е.  $\text{SO}_2$  куб. м кислорода, <sup>2)</sup> который весит  $\frac{S}{100} \cdot y$  кг; для того, чтобы иметь  $\text{O}_2$  куб. м кислорода, как избыточное в сухих газах, необходимо, само собой разумеется, столько же его и ввести в топку как излишек, но помимо сего, для сжигания водорода, находящегося в топливе в количестве  $\frac{H}{100} \cdot y$  кг, необходимо израсходовать  $\frac{8 \cdot H - O}{100} \cdot y$  кг кислорода, <sup>3)</sup> который составит объем  $V$  куб. м. Для определения последней величины выразим удельный объем кислорода через объемы  $\text{CO}_2$  и  $\text{SO}_2$ .

В самом деле, для  $\text{CO}_2$  куб. м углекислого газа требуется  $\text{CO}_2$  куб. м, или  $\frac{8}{3} \cdot \frac{C}{100} \cdot y$  кг кислорода; следовательно, объем 1 кг кислорода может быть выражен в данном случае формулой:

$$\frac{\text{CO}_2}{\frac{8}{3} \cdot \frac{C}{100} \cdot y} \quad (58)$$

Тот же объем 1 кг кислорода определяется и по  $\text{SO}_2$  как дробь:

$$\frac{\text{SO}_2}{\frac{S}{100} \cdot y} \quad (59)$$

На основании данных о сжигании водорода в нашем случае имеем тот же объем равным:

$$\frac{V}{\frac{8 \cdot H - O}{100} \cdot y} \quad (60)$$

Естественно, что

$$\frac{\text{CO}_2}{\frac{8}{3} \cdot \frac{C}{100} \cdot y} = \frac{\text{SO}_2}{\frac{S}{100} \cdot y} = \frac{V}{\frac{8 \cdot H - O}{100} \cdot y}, \quad (61)$$

<sup>1)</sup> См. формулу 21.

<sup>2)</sup> См. формулу 25.

<sup>3)</sup> Здесь  $O$  — кислород самого топлива в % его веса.

ИЛИ:

$$\frac{\text{CO}_2}{\frac{8}{3} \cdot \text{C}} = \frac{\text{SO}_2}{\text{S}} = \frac{V}{8 \cdot \text{H} - \text{O}}, \quad (62)$$

откуда

$$\frac{V}{8 \cdot \text{H} - \text{O}} = \frac{\text{CO}_2 + \text{SO}_2}{\frac{8}{3} \cdot \text{C} + \text{S}}, \quad (63)$$

ИЛИ

$$V = \frac{8 \cdot \text{H} - \text{O}}{\frac{8}{3} \cdot \text{C} + \text{S}} \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2) \quad (64)$$

Следовательно всего кислорода потребуется израсходовать:

$$\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 + \frac{8 \cdot \text{H} - \text{O}}{\frac{8}{3} \cdot \text{C} + \text{S}} \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2) \text{ куб. м. } \quad (65)$$

Вместе с кислородом воздуха в дымовые газы неизбежно попадет и азот в количестве:

$$\text{N}_2 = \frac{79,1}{20,9} \cdot \left[ \text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 + \frac{8 \cdot \text{H} - \text{O}}{\frac{8}{3} \cdot \text{C} + \text{S}} \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2) \right] \text{ куб. м. } \quad (66)$$

Подставляя найденные величины в формулу (57), получим:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 + \frac{79,1}{20,9} \cdot \left[ \text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 + \frac{8 \cdot \text{O} - \text{H}}{\frac{8}{3} \cdot \text{C} + \text{S}} \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2) \right] = \\ = 100 \end{aligned} \quad (67)$$

Умножив на  $\frac{20,9}{100}$  и сделав приведение подобных членов, получим:

$$\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 + 0,791 \cdot \frac{8 \cdot \text{H} - \text{O}}{\frac{8}{3} \cdot \text{C} + \text{S}} \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2) = 20,9 \quad (68)$$

Обозначим весь множитель, стоящий перед суммой  $(\text{CO}_2 + \text{SO}_2)$ , через  $\beta$ , т.-е. примем:

$$\beta = 0,791 \cdot \frac{8 \cdot \text{H} - \text{O}}{\frac{8}{3} \cdot \text{C} + \text{S}} = 0,791 \cdot 3 \cdot \frac{\text{H} - \frac{\text{O}}{8}}{\text{C} + \frac{3}{8} \cdot \text{S}}, \quad (69)$$

или, после перемножения:

$$\beta = 2,373 \cdot \frac{\text{H} - \frac{\text{O}}{8}}{\text{C} + \frac{3}{8} \cdot \text{S}} \quad (70)$$

УДМУНТ  
(ДНТ)

В эту формулу входят  $H$ ,  $O$ ,  $C$  и  $S$  — % содержания водорода, кислорода, углерода и серы в рабочем топливе, следовательно коэффициент  $\beta$  зависит только от химического состава топлива.

Заметим, между прочим, что большее или меньшее загрязнение топлива данного состава золой и влагой не сказывается на величине коэффициента  $\beta$ , который может быть вычислен, пользуясь цифрами химического анализа топлива, перечисленными для рабочего топлива, для абсолютно сухого вещества топлива, для беззольного и безводного состава топлива; во всех этих случаях величина  $\beta$  для данного топлива будет одна и та же.<sup>1)</sup>

Подставляя коэффициент  $\beta$  в формулу (68), получим:

$$CO_2 + SO_2 + O_2 + \beta \cdot (CO_2 + SO_2) = 20,9 \quad (71)$$

или

$$CO_2 + SO_2 + O_2 = 20,9 - \beta \cdot (CO_2 + SO_2) \quad (72)$$

Это равенство справедливо лишь при полном сгорании топлива, что будет в дальнейшем еще раз подтверждено.

Из самого определения коэффициента избытка воздуха следует, что он равен отношению поступившего для сгорания воздуха к теоретически необходимому, или, что то же: отношению кислорода, действительно израсходованного, к теоретически необходимому (минимальному) при полном сгорании топлива.

<sup>1)</sup> Впервые вывод формулы для  $\beta$ , с принятием во внимание наличия сернистого ангидрида в дымовых газах, был сделан проф. И. В. Арбатским в его работе: «Формулы топочных газов при присутствии в последних окиси углерода и сернистого газа» (см. Бюллетени Политехнического общества за 1912 г., № 7).

Если положить в формуле (70)  $S$  равным нулю, то получим формулу, которую выводит проф. А. С. Ломшаков в своей книге «Испытание паровых котлов». СПб., 1913 г., стр. 48.

Очень распространенная формула, которой и мы ранее пользовались:

$$\beta = 2,37 \cdot \frac{H - \frac{(O - S)}{8}}{C},$$

строго говоря, совершенно не верна и получена в предположении, что сера в топливе имеется, а продукты сгорания ее в дымовых газах отсутствуют, чего, конечно, быть не может. Попытка обосновать эту формулу утверждением, что  $SO_2$  поглощается водой и до газоанализатора не доходит, не основательна. Поэтому мы рекомендуем впредь пользоваться формулой для  $\beta$ , выведенной в настоящей книге с принятием во внимание наличия сернистого газа в дымовых газах, что имеет особое значение при точных опытах с топливом, загрязненным серой.

УДУНТ  
(ДНТ)

Следовательно имеем:

$$\alpha = \frac{\text{действительное количество поступившего кислорода}}{\text{теоретически необходимое количество кислорода}}, \quad (73)$$

или

$$\alpha = \frac{\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 + \frac{8 \cdot \text{H} - \text{O}}{\frac{8}{3} \cdot \text{C} + \text{S}} \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2)}{\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \frac{8 \cdot \text{H} - \text{O}}{\frac{8}{3} \cdot \text{C} + \text{S}} \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2)} \quad (74)$$

Умножив числитель и знаменатель на отношение  $\frac{79,1}{20,9}$  и вспо-  
мнив равенство (66), получим:

$$\alpha = \frac{\text{N}_2}{\text{N}_2 - \frac{79,04}{20,96} \cdot \text{O}_2} = \frac{20,9 \cdot \text{N}_2}{20,9 \cdot \text{N}_2 - 79,1 \cdot \text{O}_2} = \frac{\text{N}_2}{\text{N}_2 - 3,785 \cdot \text{O}_2} = \frac{1}{1 - 3,785 \cdot \frac{\text{O}_2}{\text{N}_2}}, \quad (75)$$

откуда

$$\frac{\text{N}_2}{\text{O}_2} = \frac{3,785 \cdot \alpha}{\alpha - 1} \quad (76)$$

На основании пропорции (62) имеем:

$$\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2} = \frac{\text{S}}{\frac{8}{3} \cdot \text{C}} = \frac{3 \cdot \text{S}}{8 \cdot \text{C}}, \quad (77)$$

то-есть отношение  $\text{SO}_2 : \text{CO}_2$  зависит исключительно от химиче-  
ского состава топлива.

Итак, при полном сгорании топлива должны быть удовлетво-  
рены следующие пять уравнений:

$$\left. \begin{aligned} 1) \quad & \text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2 = 100; \quad (57) \\ 2) \quad & \beta = 2,373 \cdot \frac{\text{H} - \frac{\text{O}}{8}}{\text{C} + \frac{3}{8} \cdot \text{S}}; \quad (70) \\ 3) \quad & \text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 = 20,9 - \beta \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2); \quad (72) \\ 4) \quad & \alpha = \frac{\text{N}_2}{\text{N}_2 - 3,785 \cdot \text{O}_2}; \quad (75) \end{aligned} \right\} \cdot (78)$$

или

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\text{N}_2}{\text{O}_2} = \frac{3,785 \cdot \alpha}{\alpha - 1} \quad (76) \\ 5) \quad & \frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2} = \frac{3 \cdot \text{S}}{8 \cdot \text{C}} \quad (77) \end{aligned} \right\}$$

НБ  
УДУНТ  
(ДПТ)



При расчете обычно задаются составом топлива и коэффициентом избытка воздуха. Следовательно из десяти величин, входящих в наши формулы, шесть тем самым известны, а четыре остальных находятся совместным решением четырех уравнений.

При испытании прибегают к помощи химического анализа. Химический анализ дымовых газов производится в практике котельных установок помощью прибора Орса, дающего состав газов в % по объему сухих газов, так как дымовые газы, прежде чем поступить в прибор Орса для их анализа, предварительно проходят через фильтр, в котором конденсируются водяные пары, в них содержащиеся.

Первый отсчет по прибору Орса дает сумму ( $\text{CO}_2 + \text{SO}_2$ ), ибо раствор едкого кали (KOH), предназначенный для поглощения углекислого газа, одновременно с ним поглощает и сернистый ангидрид ( $\text{SO}_2$ ).<sup>1)</sup>

Второй отсчет, после промывки газа во втором сифоне, где находится реактив для поглощения кислорода, дает нам сумму ( $\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2$ ).

Разница их дает содержание кислорода  $\text{O}_2$  в % объема сухих газов.

Содержание азота ( $\text{N}_2$ ) при полном сгорании находится по уравнению (57). Путем отбора средней пробы топлива и последующим его химическим анализом определяется элементарный состав рабочего топлива. Таким образом из десяти величин, входящих в наши формулы, семь оказываются известными, и остается определить только три. Третье уравнение (формула 72) в этом случае служит лишь для констатирования полноты сгорания. Следовательно задача в обоих случаях разрешена.

*Пример 9.* Требуется определить состав и количество дымовых газов при полном сгорании одного кг подмосковного угля, имеющего следующий элементарный состав (в % по весу):

<sup>1)</sup> В виду того, что вода, которой заполнена измерительная бюретка и U-образная трубка в приборе Орса, способна поглощать углекислый газ и особенно сернистый ангидрид (при 0° С один объем воды способен растворить в себе 1,8 объема  $\text{CO}_2$  и 6,88 объема  $\text{SO}_2$ ), рекомендуется наблюдать за тем, чтобы вода была насыщена этими газами. С целью уменьшить поглощение газов рекомендуется воду подкислять серной кислотой 0,5 — 1,0%. (См. И. В. Арбатский. «Руководство к употреблению прибора Орса-Фишера». Изд. Лаборатории паровых котлов МВТУ, Москва, 1912 г.)

углерода .	38,33
водорода .	3,13
кислорода	7,06
азота .	0,65
серы	3,58
зола	15,75
влаги	31,50

при условии, что сгорание происходит с избытком 40% против теоретически необходимого минимального количества воздуха, имеющего при температуре 30°C относительную влажность 50%.

*Решение.* Согласно таблице 6, получим табл. 7 и табл. 8 (см. 42 стр.):

ТАБЛИЦА 7.

С о с т а в	В е с в к и л о г р а м м а х	В % по весу газов:	
		в л а ж н ы х	с у х и х
Углекислый газ . . .	$3,667 \cdot \frac{38,33}{100} = 1,4055$	16,64	18,14
Сернистый ангидрид .	$2 \cdot \frac{3,58}{100} = 0,0716$	0,85	0,92
Кислород . . . . .	$(1,4 - 1) \cdot 1,238^1) = 0,4952$	5,86	6,39
Азот . . . . .	$3,329 \cdot 1,4 \cdot 1,238 + \frac{0,65}{100} = 5,7763$	68,37	74,55
Водяные пары .	$\frac{9 \cdot 3,13 + 31,5}{100} + 4,329 \cdot 1,4 \cdot 0,0137^2) \cdot 1,238 = 0,6995$	8,28	—
Итого кг 8,448 . .		100,00	100,00

Состав сухих газов в процентах по объему можно определить так же, пользуясь системой уравнений (78), а именно, при наших условиях имеем:

$$CO_2 + SO_2 + O_2 + N_2 = 100; \dots \quad (57')$$

$$z = 2,373 \cdot \frac{3,13 - \frac{7,06}{8}}{38,33 + \frac{3}{8} \cdot 3,58} = 0,1345; \quad (70')$$

$$CO_2 + SO_2 + O_2 = 20,9 - 0,1345 \cdot (CO_2 + SO_2); \dots \quad (72')$$

$$\frac{N_2}{O_2} = \frac{3,785 \cdot 1,4}{1,4 - 1}; \quad (76')$$

$$\frac{SO_2}{CO_2} = \frac{3 \cdot 3,58}{8 \cdot 38,33} = 0,035 \quad (77')$$

<sup>1)</sup> См. пример 5 (стр. 27).

<sup>2)</sup>  $0,0137 = \psi$ , см. пример 6 (стр. 28).

НБ  
УДУНТ  
(ДНТ)

ТАБЛИЦА 8.

Состав	Объем в куб. м	% по объему газов:	
		влажных	сухих
Углекислый газ . . . . .	$1,867 \cdot \frac{38,33}{100} = 0,7156$	10,92	12,59
Сернист. ангидрид . . . . .	$0,6993 \cdot \frac{3,58}{100} = 0,0250$	0,38	0,44
Кислород . . . . .	$0,7 \cdot (1,4 - 1) \cdot 1,238 = 0,3466$	5,29	6,10
Азот . . . . .	$2,6479 \cdot 1,4 \cdot 1,238 + 0,7954 \cdot \frac{0,65}{100} = 4,5945$	70,13	80,87
Водяные пары . . . . .	$\frac{9 \cdot 3,13 + 31,5}{80,43} + 5,3823 \cdot 1,4 \cdot 0,0137 \cdot 1,238 = 0,8697$	13,28	—
Итого куб. м 6,551 . .		100,00	100,00

Решая их, получим:

по (77')

$$SO_2 = 0,035 \quad CO_2 \quad (77'')$$

по (72') и (77')

$$CO_2 + 0,035 \cdot CO_2 + O_2 = 20,9 - 0,1345 \cdot (1 + 0,035) \cdot CO_2,$$

откуда

$$O_2 = 20,9 - 1,174 \cdot CO_2; \quad (72'')$$

по (76')

$$N_2 = \frac{3,785 \cdot 1,4}{1,4 - 1} \cdot O_2 = 13,25 \cdot O_2; \quad (76'')$$

по (76'') и (72'')

$$N_2 = 276,9 - 15,56 \cdot CO_2. \quad (76''')$$

Подставляя в формулу (57') все найденные величины, получим:

$$CO_2 \cdot (1 + 0,035 - 1,174 - 15,56) + 20,9 + 276,9 = 100; \quad (57''')$$

$$CO_2 = \frac{197,8}{15,7} = 12,60,$$

а по формулам (77''), (72'') и (76''):

$$SO_2 = 0,035 \cdot 12,6 = 0,44;$$

$$O_2 = 20,9 - 1,174 \cdot 12,6 = 6,11;$$

$$N_2 = 276,9 - 15,56 \cdot 12,6 = 80,84.$$

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)

Проверяя результаты сложением, найдем:  $12,60 + 0,44 + 6,11 + 80,84 = 99,99$ , должно же быть 100. Разница 0,01, вполне допустимая, произошла при округлениях, ибо все знаки сверх четырех значащих цифр при вычислениях отбрасывались. Разнося разницу между слагаемыми суммы пропорционально их величине, получим окончательно после округлений до сотых долей процента:

$$\begin{array}{r} \text{CO}_2 = 12,60 \\ \text{SO}_2 = 0,44 \\ \text{O}_2 = 6,11 \\ \text{N}_2 = 80,85 \\ \hline \text{Итого} . \quad . 100,00\% \end{array}$$

Сравнивая полученный результат с цифрами таблицы 8, замечаем некоторую разницу, объясняемую двумя причинами: во-первых, округлениями в подсчетах и, во-вторых, принятием во внимание в таблице 8 азота топлива который мы не учитываем, пользуясь системой уравнений (78).

Анализируя формулы (78), мы видим, что максимум  $(\text{CO}_2 + \text{SO}_2)$  мы будем иметь при минимуме  $\text{O}_2$ , а именно, когда  $\text{O}_2 = \text{нулю}$ , т.-е. при работе без излишка воздуха, с теоретически необходимым количеством воздуха.

В самом деле, на основании формулы (72) имеем:

$$\text{CO}_2 + \text{SO}_2 = \frac{20,9 - \text{O}_2}{1 + \beta}; \quad (79)$$

так как  $\beta$  зависит только от химического состава топлива (см. формулу 70), то максимум  $\text{CO}_2 + \text{SO}_2$  для топлива данного состава будет иметь место при нулевом содержании кислорода в продуктах сгорания, т.-е. когда  $\text{O}_2 = \text{нулю}$ , или:

$$(\text{CO}_2 + \text{SO}_2)_{\max} = \frac{20,9}{1 + \beta}. \quad (80)$$

Решая это уравнение совместно с уравнением (77), получим:

$$(\text{CO}_2)_{\max} = \frac{20,9}{1 + \beta} \cdot \frac{8 \cdot \text{C}}{8 \cdot \text{C} + 3 \cdot \text{S}}; \quad (81)$$

$$(\text{SO}_2)_{\max} = \frac{20,9}{1 + \beta} \cdot \frac{3 \cdot \text{S}}{8 \cdot \text{C} + 3 \cdot \text{S}} \quad (82)$$

Максимальное возможное содержание в дымовых газах углекислого газа  $(\text{CO}_2)_{\max}$  и сернистого ангидрида  $(\text{SO}_2)_{\max}$  зависит только от химического состава топлива.

Из формулы (79) имеем:

$$\text{O}_2 = 20,9 - (1 + \beta) \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2). \quad (83)$$

Обращаясь к формуле (74) и заметив на основании формулы (69), что

$$\frac{8 \cdot \text{H} - \text{O}}{\frac{8}{3} \cdot \text{C} + \text{S}} = \frac{\beta}{0,7904}; \quad (84)$$

УДКУНТ  
(ДНТ)

получим:

$$\alpha = \frac{20,9 \cdot \left(1 + \frac{\beta}{0,791} - 1 - \beta\right) \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2)}{\left(1 + \frac{\beta}{0,791}\right) \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2)} =$$

$$= \frac{20,9}{\left(1 + \frac{\beta}{0,791}\right) \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2)} + \frac{(1 - 0,791) \cdot \beta}{0,791 + \beta}, \quad (85)$$

или

$$\alpha = \frac{16,53}{(0,791 + \beta) \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2)} + \frac{0,209 \cdot \beta}{0,791 + \beta}. \quad (86)$$

Обозначая

$$\frac{16,53}{0,791 + \beta} = \lambda, \quad (87)$$

$$\frac{0,209 \cdot \beta}{0,791 + \beta} = \mu, \quad (88)$$

имеем:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\text{CO}_2 + \text{SO}_2} + \mu, \quad (89)$$

где  $\lambda$  и  $\mu$  — постоянные коэффициенты, зависящие только от химического состава топлива. Формула (89) дает возможность весьма просто подсчитать коэффициент избытка воздуха при полном сгорании топлива, опираясь на анализ газов и топлива.

В приводимой ниже таблице 9 даны соответствующие значения  $\beta$ ,  $(\text{CO}_2)_{max}$ ,  $(\text{SO}_2)_{max}$  и коэффициентов  $\lambda$  и  $\mu$  для наиболее типичных русских топлив, элементарный состав коих приведен в таблице I (см. стр. 202).

Очень часто в практике для подсчета коэффициента избытка воздуха при полном сгорании пользуются упрощенной формулой:

$$\alpha = \frac{(\text{CO}_2)_{max}}{\text{CO}_2}. \quad (90)$$

*Пример 10.* При полном сгорании дров определить избыток воздуха в толке против теоретически необходимого, если анализ топочных газов показал содержание в них углекислого газа 10%.

*Решение.* Определяем коэффициент избытка воздуха по формуле (89) пользуясь таблицей 9:

$$\alpha = \frac{19,81}{10} + 0,011 = 1,991.$$

След., избыток воздуха равен 99,1% против теоретически необходимого. По упрощенной формуле (90), пользуясь таблицей 9, найдем:

$$\alpha = \frac{20,05}{10} = 2,005.$$

Разница:  $\frac{2,005 - 1,991}{1,991} \cdot 100 = 0,7\%$ .

НБ  
УДУНТ  
(ДНТ)

ТАБЛИЦА 9.

Топливо.	$\beta$	$(CO_2 + SO_2)_{max}$	$(CO_2)_{max}$	$(SO_2)_{max}$	$\lambda$	$\epsilon$	Округленное значение $\beta$
Дрова .	0,04249	20,05	20,05	—	19,81	0,011	0,042
Торф молодой .	0,04763	19,95	19,95	—	19,67	0,012	0,048
» хороший .	0,06909	19,55	19,55	—	19,22	0,017	0,069
Бурый уголь .	0,09666	19,06	18,83	0,23	18,62	0,023	0,097
Каменные угли:							
Пламенный .	0,1179	18,7	18,5	0,2	18,19	0,027	0,118
Газовый .	0,1145	18,84	18,65	0,19	18,26	0,026	0,115
Кузнечный .	0,1209	18,65	18,46	0,19	18,13	0,028	0,121
Коксовый .	0,1218	18,63	18,44	0,19	18,11	0,028	0,122
Тощий . . . .	0,1063	18,89	18,72	0,17	18,42	0,025	0,106
Антрацит .	0,04547	19,99	19,82	0,17	19,76	0,011	0,046
Боксид (подмосковный)	0,2078	17,3	16,8	0,5	16,55	0,043	0,208
Мазут .	0,3254	15,77	15,77	—	14,81	0,061	0,325

В таблицах 3 и 6 приведены основные данные, пользуясь которыми можно определить вес и объем продуктов сгорания 1 кг топлива, подсчитывая каждое слагаемое в отдельности и затем их суммируя.

Возможно также вывести формулы, позволяющие непосредственно подсчитать количество продуктов сгорания, зная их химический анализ и состав рабочего топлива.

Обозначим для 1 кг топлива:

$G_{лс.}$  — вес продуктов сгорания;

$G_{сг.}$  — » сухих газов;

$G_{вл.}$  — » водяных паров;

$V_{лс.}$  — объем (при 0°C и 760 мм рт. ст.) продуктов сгорания;

$V_{сг.}$  — » » 0°C 760 » сухих газов;

$V_{вл.}$  — » » 0°C » 760 водяных паров.

Тогда:

$$G_{лс.} = 1 + (1 + \psi) \cdot \alpha \cdot G_0 + W_{ф.},$$

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)  
(91)

где  $W_{\phi}$ . — количество (в кг) пара, введенное в топку для сжигания 1 кг топлива, при наличии парового дутья или паровой форсунки.

$$G_{\text{вп.}} = 0,01 \cdot (9 \cdot H + W) + W_{\phi} + \psi \cdot \alpha \cdot G_0; \quad (92)$$

$$G_{\text{сг.}} = G_{\text{ис.}} - G_{\text{вп.}} \quad (93)$$

При сгорании 1 кг углерода (см. формулу 21) образуется углекислого газа:

$$\frac{44}{12 \cdot 1,9643^1)} = 1,867 = \frac{1}{0,5357} \text{ куб. м};$$

следовательно, при сгорании 1 кг топлива с содержанием С % углерода получим:

$$1,867 \cdot \frac{С}{100} = \frac{1}{0,5357} \cdot \frac{С}{100} \text{ куб. м углекислого газа.}$$

При сгорании 1 кг серы (см. формулу 25) образуется сернистого ангидрида:

$$\frac{64}{32 \cdot 2,86^2)} = 0,6993 = \frac{1}{1,43} \text{ куб. м};$$

следовательно при сгорании 1 кг топлива с содержанием S % серы, получим:

$$0,6993 \cdot \frac{S}{100} = \frac{1}{1,43} \cdot \frac{S}{100} \text{ куб. м сернистого ангидрида.}$$

Поэтому общее количество углекислого газа и сернистого ангидрида определяется при сгорании 1 кг топлива данного состава по следующей формуле (в куб. метрах):

$$\frac{С}{0,5357 \cdot 100} + \frac{S}{1,43 \cdot 100} = \frac{С + 0,375 \cdot S}{53,57}, \quad (94)$$

но, с другой стороны, то же количество может быть выражено формулой:

$$V_{\text{сг.}} \cdot \frac{CO_2 + SO_2}{100}, \quad (95)$$

где  $CO_2$  и  $SO_2$  — процентное содержание углекислого газа и сернистого ангидрида по объему сухих дымовых газов.

<sup>1)</sup>  $\frac{44}{22,4} = 1,9643 \text{ кг/м}^3$  — удельный вес углекислого газа (при 0°С и 760 мм рт. ст.).

<sup>2)</sup>  $\frac{64,07}{22,4} = 2,8602 \text{ кг/м}^3$  — удельный вес сернистого ангидрида (при 0° С и 760 мм рт. ст.).

Отсюда

$$V_{\text{сг.}} = \frac{C + 0,375 \cdot S}{0,5357 (CO_2 + SO_2)} = 1,867 \cdot \frac{C + 0,375 \cdot S}{CO_2 + SO_2} . \quad (96)$$

Разделив вес водяных паров (см. формулу 92) на 0,8043, получим объем водяных паров  $V_{\text{вл.}}$ , условно считанный при  $0^\circ \text{C}$  и 760 мм рт. ст.:

$$V_{\text{вл.}} = \frac{0,01 \cdot (9 \cdot H + W) + W_{\text{ф.}} + \psi \cdot \alpha \cdot G_0}{0,8043} . \quad (97)$$

Следовательно полный объем продуктов сгорания 1 кг топлива определяется по формуле:

$$V_{\text{пс.}} = V_{\text{сг.}} + V_{\text{вл.}} , \quad (98)$$

или

$$V_{\text{пс.}} = \frac{C + 0,375 \cdot S}{0,5357 \cdot (CO_2 + SO_2)} + \frac{0,01 \cdot (9 \cdot H + W) + W_{\text{ф.}} + \psi \cdot \alpha \cdot G_0}{0,8043} . \quad (99)$$

Необходимо подчеркнуть, что формула (99) дает объем ( $\text{м}^3$ ) продуктов полного сгорания 1 кг топлива, приведенный к «нормальному состоянию», т.-е. к давлению 760 мм рт. ст. и температуре  $0^\circ \text{C}$ .

При пользовании этой формулой, годной лишь для полного сгорания, нужно помнить, что не весь углерод топлива используется в топке; частью он уносится в газоходы, проваливается в зольник и выгребается со шлаками.

Поэтому при определении по формуле (99) количества продуктов сгорания, получаемых из 1 кг топлива, заброшенного в топку, следует в числитель вставлять не  $C$  — содержание углерода (в %) в топливе, а  $C_{\text{с.}}$  — количество сгоревшего углерода, исчисленного в процентах веса рабочего топлива:

$$C_{\text{с.}} = C - (C_{\text{шл.}} + C_{\text{пр.}} + C_{\text{ун.}}) , \quad (100)$$

где  $C_{\text{шл.}}$ ,  $C_{\text{пр.}}$ ,  $C_{\text{ун.}}$  — количество углерода в шлаках, провале и уносе, приходящееся (в %) на 1 кг топлива, заброшенного в топку.<sup>1)</sup>

При точных опытах аналогичную поправку следует делать и для серы.

Когда требуется знать полный объем продуктов сгорания 1 кг топлива при какой-либо температуре их  $T^\circ \text{C}$ , отличной от нуля, то он опре-

<sup>1)</sup> То же относится к формуле (96) и к формулам, приведенным в таблицах 3 и 6 (стр. 31 и 35).



деляется согласно законам термодинамики по следующей формуле:

$$V_T = V_{\text{ис.}} \cdot \frac{T + 273}{273}, \quad (101)$$

где  $V_T$  — объем продуктов сгорания, приведенный к давлению 760 мм рт. ст. при температуре  $T^\circ \text{C}$ .

При желании привести объем к барометрическому давлению  $P_6$  мм рт. ст. при температуре  $T^\circ \text{C}$  нужно воспользоваться формулой:

$$V_{T6} = V_{\text{ис.}} \cdot \frac{T + 273}{273} \cdot \frac{760}{P_6}. \quad (102)$$

Разницей давлений в газоходах и вне их при подсчете объемов газа обычно всегда пренебрегают, в виду ее малости,<sup>1)</sup> но, само собой понятно, нет никаких препятствий учесть и ее, вводя соответствующий знаменатель вместо  $P_6$  в формулу (102).

*Пример 11.* Определить объем продуктов сгорания, ежесекундно образующийся в топке котла, если в ней сжигается подмосковный уголь с содержанием углерода 38,33%, водорода 3,13%, серы 3,58% и влаги 31,50%, при условии, что сгорание полное. Коэффициент избытка воздуха 40%. Относительная влажность 50%, при температуре воздуха в  $30^\circ \text{C}$ . Температура в топке  $1050^\circ \text{C}$ . Количество сжигаемого угля 3 тонны в час.

*Решение.* В примере 9 мы уже вычислили

$$\beta = 0,1345 \dots \dots \dots (70')$$

Подставляя эту величину в формулы (87), (88) и (89), находим:

$$\lambda = \frac{16,53}{0,791 + 0,1345} = 17,86; \dots \dots (87')$$

$$\mu = \frac{0,209 \cdot 0,1345}{0,791 + 0,1345} = 0,03; \dots \dots (88')$$

$$\text{CO}_2 + \text{SO}_2 = \frac{17,86}{1,4 - 0,03} = 13,04. \dots \dots (89')$$

Беря из примера 4 величину  $\psi = 0,0137$  и подставляя найденную величину  $\text{CO}_2 + \text{SO}_2$  в формулы (99) и (101), получим для 1 кг угля:

$$V_{\text{ис.}} = \frac{38,33 + 0,375 \cdot 3,58}{0,5357 \cdot 13,04} + \frac{0,01 \cdot (9 \cdot 3,13 + 31,5) + 0,0137 \cdot 1,4 \cdot 5,359}{0,8043} = 6,55 \text{ м}^3; \dots \dots (99')$$

$$V_T = 6,55 \cdot \frac{1050 + 273}{273} = 31,74 \text{ м}^3, \dots \dots (101)$$

<sup>1)</sup> Разрежения в газоходах измеряются в миллиметрах водяного столба и выражаются цифрами  $\pm 60$  мм вод. ст., редко выходя за эти пределы (как, например, в паровозных котлах), где мы имеем иногда 200 и даже 250 мм вод. ст. Давление 1 мм вод. ст. =  $1 \text{ кг/м}^2$ .

УДУНТ  
(ДИТ)

и окончательно находим объем продуктов сгорания, ежесекундно образующийся в топке котла при сгорании 3 тонн угля равным:

$$\frac{31,74 \cdot 3000}{3600} = 2,645 \text{ м}^3 \text{ в секунду.}$$

### ГЛАВА ДЕВЯТАЯ.

## СОСТАВ И КОЛИЧЕСТВО ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ОДНОГО КИЛОГРАММА ТОПЛИВА С КОЭФФИЦИЕНТОМ ИЗБЫТКА ВОЗДУХА $\alpha > 1$ И ПРИ НАЛИЧИИ В НИХ ОКИСИ УГЛЕРОДА.

При сгорании углерода топлива частью в углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), согласно формуле (21), а частью в окись углерода ( $\text{CO}$ ), согласно формуле (26), и при наличии избытка воздуха продукты сгорания будут состоять из углекислого газа, окиси углерода, сернистого ангидрида, кислорода, азота и водяного пара.

Обозначим состав продуктов сгорания в процентах по объему сухих газов соответственно через:

- $\text{CO}_2$  — углекислого газа;
- $\text{SO}_2$  — сернистого ангидрида;
- $\text{CO}$  — окиси углерода;
- $\text{O}_2$  — кислорода;
- $\text{N}_2$  — азота.

Тогда

$$\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 + \text{CO} + \text{N}_2 = 100 \quad . \quad (103)$$

Обращаясь к термохимическим уравнениям, видим, что при сгорании единицы веса углерода как в углекислый газ, так и в окись углерода, мы получаем разные их весовые количества но одинаковые объемы. Следовательно, если при сгорании 1 кг топлива, содержащего  $C\%$  углерода, образовалось  $V_{\text{сг. куб. м}}$  сухого газа с содержанием  $\text{CO}_2\%$  углекислого газа и  $\text{CO}\%$  окиси углерода, и предполагая, что весь углерод, заключенный в топливе, фактически сгорел, можем утверждать, что количество углерода, сгоревшего в углекислый газ, составит  $a$  кг, а количество углерода, сгоревшего в окись углерода,  $b$  кг, при чем:

$$a + b = \frac{C}{100}; \quad (104)$$

$$\frac{a}{b} = \frac{\text{CO}_2}{\text{CO}}, \quad (105)$$

откуда

$$\frac{a+b}{b} = \frac{\text{CO}_2 + \text{CO}}{\text{CO}},$$

или

$$\frac{b}{a+b} = \frac{\text{CO}}{\text{CO}_2 + \text{CO}};$$

откуда

$$b = (a+b) \cdot \frac{\text{CO}}{\text{CO}_2 + \text{CO}} = \frac{C}{100} \cdot \frac{\text{CO}}{\text{CO}_2 + \text{CO}} \text{ кг}; \quad (106)$$

$$a = b \cdot \frac{\text{CO}_2}{\text{CO}} = \frac{C}{100} \cdot \frac{\text{CO}_2}{\text{CO}_2 + \text{CO}} \text{ кг} \quad (107)$$

Следовательно, если известно содержание углекислого газа и окиси углерода в % объема сухих дымовых газов, а также содержание углерода в % по весу рабочего топлива, то количество углерода, пошедшего на образование  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$  при сгорании одного килограмма топлива, определяется весьма просто по формулам, нами только-что найденным, а именно: при сгорании одного килограмма топлива, количество углерода, пошедшее на образование углекислого газа, равняется:

$$\frac{C}{100} \cdot \frac{\text{CO}_2}{\text{CO}_2 + \text{CO}} \text{ кг}, \quad (107)$$

а количество углерода, пошедшее на образование окиси углерода, равняется:

$$\frac{C}{100} \cdot \frac{\text{CO}}{\text{CO}_2 + \text{CO}} \text{ кг}. \quad (106)$$

Когда не весь углерод, входящий в состав топлива, сгорает полностью, а часть его осталась неиспользованной в провале ( $C_{\text{пр.}}$ ), в уносе ( $C_{\text{ун.}}$ ) и в шлаках ( $C_{\text{шл.}}$ ) (так называемая «механическая неполнота сгорания»), то вместо  $C$  (количество углерода в % по весу рабочего топлива) нужно в формулы (107) и (106) вставлять:

$$C_c = C - (C_{\text{пр.}} + C_{\text{ун.}} + C_{\text{шл.}}), \quad (100)$$

где  $C_{\text{пр.}}$ ,  $C_{\text{ун.}}$ ,  $C_{\text{шл.}}$  — содержание углерода соответственно в провале, в уносе, в шлаках, исчисленное в % по весу рабочего топлива.

На основании формулы (21) мы уже знаем, что при полном сгорании 1 кг углерода образуется  $1,867 = \frac{1}{0,5357}$  куб. м углекислого газа (см. стр. 46); на основании же формулы (26)

также получим, что и окиси углерода при сгорании в последнюю 1 кг углерода образуется то же количество. В самом деле

$$\frac{28}{12 \cdot 1,25^1)} = 1,867 \text{ куб. м.}$$

Этим, между прочим, еще раз подтверждается соотношение (105), непосредственно вытекающее из рассмотрения термохимических уравнений (21) и (26), применяя к ним правило Авогадро.<sup>2)</sup>

Поэтому мы получим:

углекислого газа	1,867 · a м <sup>3</sup>
окиси углерода	1,867 · b м <sup>3</sup> ,

если обозначим, согласно стр. 49, через a кг количество углерода, перешедшее в углекислый газ, а через b кг количество углерода, перешедшее в окись углерода при сгорании одного килограмма топлива.

На основании же процентного состава сухих продуктов сгорания мы имеем:

углекислоты	· $\frac{\text{CO}_2}{100} \cdot V_{\text{сг.}} \text{ м}^3,$
окиси углерода .	$\frac{\text{CO}}{100} \cdot V_{\text{сг.}} \text{ м}^3,$

следовательно

$$1,867 \cdot a = \frac{\text{CO}_2}{100} \cdot V_{\text{сг.}}; \quad (108)$$

$$1,867 \cdot b = \frac{\text{CO}}{100} \cdot V_{\text{сг.}} \quad (109)$$

Разделив почленно первое равенство на второе, получим равенство (105):

$$\frac{a}{b} = \frac{\text{CO}_2}{\text{CO}}; \quad (105)$$

Итак, при сгорании «всего» углерода топлива <sup>3)</sup> в углекислый газ и окись углерода одновременно, количество углерода, сгоревшего в окись углерода, определяется по формуле:

$$\frac{C}{100} \cdot \frac{\text{CO}}{\text{CO}_2 + \text{CO}} \text{ кг.} \quad (106)$$

<sup>1)</sup>  $\frac{28}{22,4} = 1,25 \text{ кг/м}^3$  — удельный вес окиси углерода (при 0°C и 760 мм рт. ст.).

<sup>2)</sup> См. стр. 21.

<sup>3)</sup> Здесь слово «всего» поставлено в кавычках, чтобы напомнить о том, что часть углерода топлива теряется механически с уносом, с провалом и со шлаками (см. стр. 50).

Заметим, что при сгорании 1 кг углерода в углекислый газ выделяется тепла  $\frac{97\,200}{12} = 8100$  калорий, <sup>1)</sup> при сгорании того же количества углерода в окись углерода—только  $\frac{2 \cdot 29\,160}{24} = 2430$  калорий <sup>2)</sup> тепла, т.-е. при сгорании углерода в окись углерода мы имеем потерю  $8100 - 2430 = 5670$  калорий тепла на каждый килограмм сгоревшего углерода.

Следовательно потеря от химической неполноты сгорания 1 кг топлива, обозначенная нами через  $Q_3$  калорий, составит величину:

$$5670 \cdot \frac{C}{100} \cdot \frac{CO}{CO_2 + CO},$$

или

$$Q_3 = 56,7 \cdot C \cdot \frac{CO}{CO_2 + CO}. \quad (110)$$

Обращаясь далее к уравнению (26), можем утверждать, что для получения  $CO$  куб. м окиси углерода нужно затратить  $\frac{CO}{2}$  куб. м кислорода, весом:

$$\frac{32}{24} \cdot \frac{C}{100} \cdot \frac{CO}{CO_2 + CO} \cdot y_1 = \frac{4}{3} \cdot \frac{C}{100} \cdot \frac{CO}{CO_2 + CO} \cdot y_1,$$

где  $y_1$  — количество килограммов топлива, необходимого для получения 100 куб. м сухого газа указанного состава (см. формулу 103), а  $\left(\frac{C}{100} \cdot \frac{CO}{CO_2 + CO} \cdot y_1\right)$  — количество килограммов углерода, сгоревшего при этом в окись углерода (см. формулу 106) и давшего  $CO$  куб. м окиси углерода.

Следовательно объем 1 кг кислорода можно выразить в данном случае формулой:

$$\frac{\frac{CO}{2}}{\frac{4}{3} \cdot \frac{C}{100} \cdot \frac{CO}{CO_2 + CO} \cdot y_1}. \quad (111)$$

По формулам (107), (21), (25) и (23) имеем для того же объема, в нашем случае неполного сгорания топлива, следующие формулы (ср. стр. 36):

<sup>1)</sup> См. формулу (21).

<sup>2)</sup> См. формулу (26).

$$\frac{\frac{CO_2}{\frac{8}{3} \cdot \frac{C}{100} \cdot \frac{CO_2}{CO_2 + CO} \cdot y_1}}{1)} \quad (112)$$

$$\frac{\frac{SO_2}{\frac{S}{100} \cdot y_1}}{\cdot} \quad (113)$$

$$\frac{\frac{V}{\frac{8 \cdot H - O}{100} \cdot y_1}}{\cdot} \quad (114)$$

и следовательно

$$\begin{aligned} \frac{\frac{\frac{CO}{2}}{\frac{4}{3} \cdot \frac{C}{100} \cdot \frac{CO}{CO_2 + CO} \cdot y_1}}{=} &= \frac{\frac{CO_2}{\frac{8}{3} \cdot \frac{C}{100} \cdot \frac{CO_2}{CO_2 + CO} \cdot y_1}}{=} \\ &= \frac{\frac{SO_2}{\frac{S}{100} \cdot y_1}}{=} = \frac{\frac{V}{\frac{8 \cdot H - O}{100} \cdot y_1}}{\cdot} \end{aligned} \quad (115)$$

или

$$\frac{\frac{CO_2}{\frac{8}{3} \cdot \frac{C}{100} \cdot \frac{CO_2}{CO_2 + CO}}{=} = \frac{\frac{CO}{\frac{8}{3} \cdot \frac{C}{100} \cdot \frac{CO}{CO_2 + CO}}{=} = \frac{\frac{SO_2}{S}}{=} = \frac{V}{8 \cdot H - O}, \quad (116)$$

откуда определяется  $V$  — количество кислорода в кубических метрах, необходимое для сгорания водорода, находящегося в топливе, а именно:

$$\frac{V}{8 \cdot H - O} = \frac{CO_2 + CO + SO_2}{\frac{8}{3} \cdot \frac{C}{100} \cdot \frac{CO_2}{CO_2 + CO} + \frac{8}{3} \cdot \frac{C}{100} \cdot \frac{CO}{CO_2 + CO} + S},$$

или

$$V = \frac{8 \cdot H - O}{\frac{8}{3} \cdot C + S} \cdot (CO_2 + CO + SO_2). \quad (117)$$

Следовательно всего кислорода потребуется израсходовать в куб. метрах (при  $0^\circ C$  и 760 мм рт. ст.):

$$CO_2 + SO_2 + \frac{CO}{2} + O_2 + \frac{8 \cdot H - O}{\frac{8}{3} \cdot C + S} \cdot (CO_2 + CO + SO_2), \quad (118)$$

вместе с которым войдет азот воздуха в количестве куб. метров:

$$N_2 = \frac{79,1}{20,9} \cdot \left[ CO_2 + SO_2 + \frac{CO}{2} + O_2 + \frac{8 \cdot H - O}{\frac{8}{3} \cdot C + S} \cdot (CO_2 + CO + SO_2) \right] \quad (119)$$

<sup>1)</sup> Здесь  $\frac{C}{100} \cdot \frac{CO_2}{CO_2 + CO} \cdot y_1$  есть количество углерода, сгоревшего в углекислый газ при расходе топлива  $y_1$  кг (см. формулу 107).

Подставляя найденную величину в уравнение (103), имеем:

$$\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{CO} + \text{O}_2 + \frac{79,1}{20,9} \cdot \left[ \text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \frac{\text{CO}}{2} + \text{O}_2 + \frac{8 \cdot \text{H} - \text{O}}{\frac{8}{3} \cdot \text{C} + \text{S}} \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{CO}) \right] = 100, \quad (120)$$

или, умножая обе части равенства на  $\frac{20,9}{100}$ , получим после приведения подобных членов:

$$\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + 0,6045 \cdot \text{CO} + \text{O}_2 + 0,791 \cdot \frac{8 \cdot \text{H} - \text{O}}{\frac{8}{3} \cdot \text{C} + \text{S}} \cdot (\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{SO}_2) = 20,9, \quad (121)$$

или, вспоминая обозначение:

$$\beta = 0,791 \cdot \frac{8 \cdot \text{H} - \text{O}}{\frac{8}{3} \cdot \text{C} + \text{S}} = 2,373 \cdot \frac{\text{H} - \frac{\text{O}}{8}}{\text{C} + \frac{3}{8} \cdot \text{S}}, \quad (70)$$

имеем:

$$\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + 0,6045 \cdot \text{CO} + \text{O}_2 = 20,9 - \beta \cdot (\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{SO}_2), \quad (122)$$

откуда

$$\text{CO} = \frac{20,9 - \beta \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2) - (\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2)}{0,6045 + \beta}, \quad (123)$$

или

$$\text{CO} = \frac{Z}{0,6045 + \beta}, \quad (124)$$

где

$$Z = 20,9 - \beta \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2) - (\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2) \quad (125)$$

Величина  $Z$  может быть названа *характеристикой неполноты сгорания*.

Так как коэффициент  $\beta$  зависит только от химического состава топлива, а последний (состав топлива) во время протекания процесса сгорания топлива все время *меняется* за счет постепенного окисления топлива и неодновременного выгорания его составных частей, то величина  $Z$  может дать правильную картину протекающего в толке процесса только при условии, что величины  $(\text{CO}_2 + \text{SO}_2)$  и  $(\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2)$  суть результат анализа *непрерывно* берущихся средних проб за определенный достаточно долгий промежуток времени.

Судить о неполноте сгорания по отдельным единичным пробам, взятым в какой-нибудь произвольный момент, никоим образом нельзя.

УДУНТ  
(ДНТ)

Содержание окиси углерода в продуктах сгорания отсутствует, когда  $Z = \text{нулю}$ .<sup>1)</sup> Последнее условие приводит нас к равенству:

$$20,9 - \beta \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2) = \text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2, \quad (72)$$

которое нам уже знакомо.

Чтобы выразить коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  при неполном сгорании через состав продуктов сгорания, необходимо отметить, что в этом случае содержание свободного кислорода  $\text{O}_2$  в продуктах сгорания не может рассматриваться полностью как избыточное, ибо в эту величину входит и тот кислород, который мог бы быть использован для дожигания окиси углерода в углекислый газ, т.-е.  $\frac{\text{CO}}{2}$ . Следовательно, избыточный кислород равен:

$$\text{O}_2 - \frac{\text{CO}}{2},$$

а избыточно введенный с ним азот воздуха:

$$\frac{79,1}{20,9} \cdot \left( \text{O}_2 - \frac{\text{CO}}{2} \right) = 3,785 \cdot \left( \text{O}_2 - \frac{\text{CO}}{2} \right); \quad (126)$$

отметив это, будем иметь:

$$\alpha = \frac{\text{N}_2}{\text{N}_2 - 3,785 \cdot (\text{O}_2 - 0,5 \cdot \text{CO})} = \frac{1}{1 - 3,785 \cdot \frac{\text{O}_2 - 0,5 \cdot \text{CO}}{\text{N}_2}} \quad (127)$$

или

$$\frac{\text{N}_2}{\text{O}_2 - \frac{\text{CO}}{2}} = \frac{3,785 \cdot \alpha}{\alpha - 1} \quad (128)$$

Соотношение же между  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  и  $\text{CO}$  находится на основании равенства (116), откуда имеем:

$$\frac{\text{SO}_2}{\text{S}} = \frac{\text{CO}_2 + \text{CO}}{\frac{8}{3} \cdot \text{C}}, \quad (129)$$

или

$$\text{SO}_2 = \frac{3 \cdot \text{S}}{8 \cdot \text{C}} \cdot (\text{CO}_2 + \text{CO}) \quad (130)$$

Итак, при неполном сгорании топлива мы имеем следующие семь уравнений:

<sup>1)</sup> См. стр. 67.



$$\left. \begin{aligned} \text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{CO} + \text{O}_2 + \text{N}_2 &= 100; & (103) \\ Q_3 &= 56,7 \cdot C \cdot \frac{\text{CO}}{\text{CO}_2 + \text{CO}}; & (110) \\ \beta &= 2,373 \cdot \frac{\text{H} - \frac{0}{8}}{C + \frac{3}{8} \cdot S}; & (70) \\ \text{CO} &= \frac{Z}{0,6045 + \beta}; & (124) \\ Z &= 20,9 - \beta \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2) - (\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2); & (125) \\ \alpha &= \frac{\text{N}_2}{\text{N}_2 - 3,785 \cdot \left( \text{O}_2 - \frac{\text{CO}}{2} \right)}; & (127) \\ \text{SO}_2 &= \frac{3 \cdot S}{8 \cdot C} \cdot (\text{CO}_2 + \text{CO}) & (130) \end{aligned} \right\} (131)$$

При расчете новых установок искомым является состав продуктов сгорания  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$  и  $\text{N}_2$ , а данными величинами считаются: состав топлива ( $C$ ,  $O$ ,  $H$ ,  $S$ ), коэффициент избытка воздуха ( $\alpha$ ) и потеря от химической неполноты сгорания ( $Q_3$ ). Последними двумя величинами задаются на основании данных испытаний аналогичных установок или берут их по оценке. Величины коэффициентов избытков воздуха, практически достижимые в топке, уже были приведены в предыдущей главе VI (табл. 2, стр. 29). Величинами же потерь от химической неполноты сгорания можно задаться, руководствуясь следующими соображениями.

Прежде всего, надо помнить, что, помимо конструкции топки, на величину  $Q_3$  сильно влияет характер и качество горючего а также в значительной мере и работа персонала, обслуживающего котельную.

При расчете мы полагаем, что процесс сгорания топлива заканчивается в топке (хотя на практике очень часто имеет место догорание в газоходах) и кроме того считаем, что сама топка сконструирована с достаточным объемом, гарантирующим устойчивое бездымное сгорание с отсутствием в продуктах сгорания водорода, метана и других углеводородов.

Наличие в продуктах сгорания некоторого количества окиси углерода мы считаем возможным допустить даже в хорошо продуманной топке и при правильной эксплуатации ее, по особым соображениям, о которых будет сказано дальше. <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> См. главу XVII, стр. 93 и след.

Выражая потерю от химической неполноты сгорания в % от рабочей теплопроизводительности топлива и обозначая ее через  $q_3$ , будем иметь:

$$q_3 = \frac{Q_s}{Q_{\text{раб.}}} \cdot 100. \quad (132)$$

Величиной  $q_3$  задаются при расчете, пользуясь следующей таблицей:

ТАБЛИЦА 10.

Род топки и способ ее обслуживания	$q_3$ в %
Колосниковая решетка с ручной загрузкой для пламенного топлива . . . . .	2 — 5
Колосниковая решетка с ручной загрузкой для антрацита . . . . .	0 — 2
Механическая топка с верхним забросом . . . . .	1 — 3
Механическая топка с подвижной решеткой и нижней подачей . . . . .	0 — 1
Ступенчатые и наклонные топки . . . . .	0 — 3
Шахтные топки . . . . .	0 — 1
Нефтяные топки . . . . .	0 — 2
Топки для сжигания газообразного топлива . . . . .	0 — 3
пылевидного топлива . . . . .	0 — 2

Объем сухих продуктов сгорания при наличии в них окиси углерода может быть определен по формуле (96); нужно лишь  $\text{CO}_2 + \text{SO}_2$  заменить в ней  $\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{CO}$ :

$$V_{\text{сг.}} = \frac{C + 0,375 \cdot S}{0,5357 \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{CO})} \quad (133)$$

Вывод формулы (133) в точности аналогичен с выводом формулы (96).

Объем водяных паров определяется по формуле (97).

Полный объем продуктов сгорания 1 кг топлива вычисляется при наличии в них окиси углерода по формуле:

$$V_{\text{пс.}} = \frac{C + 0,375 \cdot S}{0,5357 \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{CO})} + \frac{0,01 (9 \cdot H + W) + W_{\phi} + \psi}{0,8043} \alpha \cdot G_0. \quad (134)$$

Формулы (98), (91), (92) и (93) сохраняют правильность и для данного случая.

При испытаниях данными являются обычно: состав топлива (C, O, H, S), сумма углекислого газа и сернистого ангидрида

( $\text{CO}_2 + \text{SO}_2$ ) и затем содержание кислорода  $\text{O}_2$  или сумма ( $\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2$ ).

Искомыми же величинами являются: потери от химической неполноты сгорания ( $Q_3$ ) и коэффициент избытка воздуха ( $\alpha$ ).

Уравнение (130) в данном случае может остаться неиспользованным, если не желают знать отдельное содержание  $\text{SO}_2$  и  $\text{CO}_2$ , но в последнем случае необходимо формулу (110) преобразовать следующим образом.

На основании формулы (129) имеем:

$$\frac{\text{CO}_2 + \text{CO}}{\frac{8}{3} \cdot \text{C}} = \frac{\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{SO}_2}{\frac{8}{3} \cdot \text{C} + \text{S}}, \quad (135)$$

или

$$\text{CO}_2 + \text{CO} = \frac{\frac{8}{3} \cdot \text{C}}{\frac{8}{3} \cdot \text{C} + \text{S}} \cdot (\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{SO}_2) \quad (136)$$

Подставляя найденную сумму в уравнение (110), получим:

$$\begin{aligned} Q_3 &= 56,7 \cdot \text{C} \cdot \frac{\frac{8}{3} \cdot \text{C} + \text{S}}{\frac{8}{3} \cdot \text{C}} \cdot \frac{\text{CO}}{\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{CO}} = \\ &= 56,7 \cdot \frac{(\text{C} + 0,375 \cdot \text{S}) \cdot \text{CO}}{\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{CO}} \end{aligned} \quad (137)$$

В заключение отметим, что на практике избегают в котельных пользоваться непосредственным определением окиси углерода путем ее поглощения в виду ненадежности такого анализа, так как в качестве поглотителя употребляют аммиачный раствор полухлористой меди ( $\text{CuCl}$ ), являющийся наилучшим поглотителем  $\text{CO}$ , но обладающий способностью легко при благоприятных обстоятельствах выделять газ, ранее поглощенный раствором. Этот реактив работает хорошо, когда в газе содержится большое количество окиси углерода, что имеет место, например, в газогенераторах,<sup>1)</sup> но когда пробуют пользоваться им для исследования топочных газов, где, при правильной работе, очень редко содержание окиси углерода превышает 2 — 3%, реактив этот уже не дает тех результатов, каковые нам хотелось бы иметь.

<sup>1)</sup> В этом случае также нужно быть осторожным и помнить, что аммиачный раствор полухлористой меди поглощает помимо окиси углерода ( $\text{CO}$ ) также ацетилен ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ), этилен ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ), кислород ( $\text{O}_2$ ) и другие газы, что необходимо иметь в виду, соблюдая строгий порядок чередований поглотителей.

Поэтому предпочитают находить CO по формуле (124). Если же CO было определено непосредственно анализом, то формула (124) служит до некоторой степени <sup>1)</sup> проверкой правильности анализа.

*Пример 12.* В котельной сжигается подмосковный курный уголь с  $\%$  содержанием:

углерода .	. 38,33%
водорода . . . . .	3,13 »
кислорода . .	7,06 »
азота	0,65 »
серы .	3,58 »
зола	. 15,75 »
влаги . . . . .	. 31,50 »

В первой смене кочегаров средний состав продуктов сгорания, определяемый по прибору Орса, оказался равным:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 + \text{SO}_2 &= 13,04 \\ \text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 &= 19,15. \end{aligned}$$

Во второй смене кочегаров:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 + \text{SO}_2 &= 13,55 \\ \text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 &= 18,71. \end{aligned}$$

Определить избыток воздуха и потерю от химической неполноты сгорания для той и другой смены, считая, что «весь» углерод топлива сгорел т.-е. пренебрегая потерями углерода в шлаках, провале и уносе).

*Решение.* В примере 9 мы вычислили для данного угля

$$\beta = 0,1345; \quad (70')$$

поэтому, для первой смены получим по формуле (125):

$$Z = 20,9 - 0,1345 \cdot 13,04 - 19,15 = 0$$

по формуле (124)

$$\text{CO} = \text{нулю},$$

т.-е. можно считать, что первая смена работала с полным сгоранием и, следовательно, потеря от химической неполноты сгорания должна быть признана нулевой, коэффициент же избытка воздуха может быть вычислен по формуле (75), в которую следует подставить:

$$\text{N}_2 = 100 - 19,15 = 80,85$$

$$\text{O}_2 = 19,15 - 13,04 = 6,11,$$

после чего получим:

$$\alpha = \frac{80,85}{80,85 - 3,785 \cdot 6,11} = 1,4$$

<sup>1)</sup> См. стр. 67.

или по формулам (87), (88) и (89):

$$\begin{aligned}\lambda &= 17,86 \text{ (см. стр. 44)} \\ \mu &= 0,03 \text{ (» » 44)} \\ \alpha &= \frac{17,86}{13,04} + 0,03 = 1,4.\end{aligned}$$

Для второй смены имеем:  
по формуле (125):

$$Z = 20,9 - 0,1345 \cdot 13,65 - 18,71 = 0,3541; \quad (125)$$

по формуле (124):

$$CO = \frac{0,3541}{0,6045 + 0,1345} = 0,48; \quad (124')$$

по формуле (103):

$$N_2 = 100 - 18,71 - 0,48 = 80,81; \quad (103')$$

далее,

$$O_2 = 18,71 - 13,65 = 5,06$$

и по формуле (127):

$$\alpha = \frac{80,81}{80,81 - 3,785 \cdot \left(5,06 - \frac{0,48}{2}\right)} = 1,33; \quad (127')$$

по формуле (137):

$$Q_3 = 56,7 \cdot (38,33 + 0,375 \cdot 3,58) \cdot \frac{0,48}{(13,55 + 0,48)} = 76,95.$$

В примере 3 на стр. 18 мы вычислили рабочую теплопроизводительность нашего угля  $Q_{\text{раб.}} = 3595 \text{ кал/кг}$ ; следовательно потеря от химической неполноты сгорания в % от теплопроизводительности топлива определится по формуле (132), равной:

$$q_3 = \frac{76,95}{3595} \cdot 100 = 2,14\%.$$

Следовательно уменьшение избытка воздуха во второй смене достигнуто за счет появления потери от химической неполноты сгорания.

## ГЛАВА ДЕСЯТАЯ.

### СОСТАВ И КОЛИЧЕСТВО ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ОДНОГО КИЛОГРАММА ТОПЛИВА С КОЭФФИЦИЕН- ТОМ ИЗБЫТКА ВОЗДУХА $\alpha > 1$ И ПРИ НАЛИЧИИ В НИХ ОКИСИ УГЛЕРОДА, ВОДОРОДА, МЕТАНА И ДЫМА.

Обозначая в этом случае состав продуктов сгорания в % по объему сухих газов соответственно через:

$CO_2$  — углекислого газа;

$SO_2$  — сернистого ангидрида;

$CO$  — окиси углерода;

НБ  
УДУНТ  
(ДНТ)

$\text{CH}_4$  — метана;  
 $\text{H}_2$  — водорода;  
 $\text{O}_2$  — кислорода;  
 $\text{N}_2$  — азота;

получим:

$$\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 + \text{CO} + \text{H}_2 + \text{CH}_4 + \text{N}_2 = 100 \quad . \quad (138)$$

Обозначим через:

$C^A$  — количество углерода, находящееся в продуктах сгорания в виде дыма (сажи);

$C_1$  — количество углерода, перешедшее в продукты сгорания в виде составных частей углекислого газа, окиси углерода и метана.

Тогда, выразив то и другое ( $C^A$  и  $C_1$ ) в процентах веса рабочего топлива, получим, при отсутствии потерь углерода в шлаках, провале и уносе [ $C_{\text{шл.}} + C_{\text{пр.}} + C_{\text{ун.}} = 0$ ]:

$$C_1 = C - C^A, \quad . \quad (139)$$

где  $C$  — количество углерода (в %) в рабочем топливе.

Предположим, что при указанном сгорании 1 кг топлива перешло в:

углекислый газ  $a$  кг углерода  
 окись углерода  $b$  »  
 метан  $d$  » »

Тогда

$$a + b + d = \frac{C - C^A}{100} = \frac{C_1}{100} \quad . \quad (140)$$

На основании же термохимических уравнений (21), (22) и (26) утверждаем, что при сгорании 1 кг углерода как в углекислый газ, так и в окись углерода и в метан, получают одинаковые объемы последних, <sup>1)</sup> т.-е. должны иметь место следующие отношения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{a}{b} &= \frac{\text{CO}_2}{\text{CO}} \\ \frac{a}{d} &= \frac{\text{CO}_2}{\text{CH}_4} \\ \frac{b}{d} &= \frac{\text{CO}}{\text{CH}_4} \end{aligned} \right\} \quad . \quad (141)$$

<sup>1)</sup> При сгорании 1 кг углерода в метан последнего образуется (см. формулу 22):

$$\frac{16}{12 \cdot 0,7157} = 1,867 \text{ куб. м (ср. стр. 46 и 51).}$$

УДУНТ  
(ДИТ)

откуда:

$$\frac{a+b}{b} = \frac{\text{CO}_2 + \text{CO}}{\text{CO}};$$

$$\frac{a+b}{d} = \frac{\text{CO}_2 + \text{CO}}{\text{CH}_4};$$

$$\frac{a+b+d}{d} = \frac{\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4}{\text{CH}_4}.$$

Но

$$a+b+d = \frac{C_1}{100}; \quad (140)$$

следовательно

$$d = \frac{C_1}{100} \cdot \frac{\text{CH}_4}{\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4}; \quad (142)$$

$$b = \frac{C_1}{100} \cdot \frac{\text{CO}}{\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4}; \quad (143)$$

$$a = \frac{C_1}{100} \cdot \frac{\text{CO}_2}{\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4} \quad (144)$$

Ранее (см. стр. 52) была определена потеря тепла при сгорании 1 кг углерода в окись углерода, оказавшаяся равной 5670 калориям.

При сгорании 1 кг углерода в метан выделяется тепла  $\frac{22\ 250}{12} = 1854$  калории. Следовательно потеря тепла по сравнению со сгоранием углерода в углекислый газ составляет:  $8100 - 1854 = 6246$  калорий, да кроме того потеряно тепла в водороде, заключенном в метане, 29 030 калорий на 1 кг водорода, или  $\frac{29\ 030 \cdot 4}{12} = 9677$  калорий на 1 кг углерода, или всего  $6246 + 9677 = 15\ 923$  калории на каждый килограмм углерода, сгоревшего в метан.<sup>1)</sup>

Следовательно потеря тепла от неполного сгорания углерода, или, что то же, от наличия в продуктах сгорания окиси углерода, метана и дыма (сажи), может быть исчислена по формуле:

$$Q'_3 = \frac{56,7 \cdot \text{CO} + 159,2 \cdot \text{CH}_4}{\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4} \cdot (\text{C} - \text{C}^{\text{д}}) + 81 \cdot \text{C}^{\text{д}} \quad (145)$$

К этой потере необходимо прибавить еще потерю в виде тепла, ушедшего с водородом, свободно содержащимся в дымовых газах.

<sup>1)</sup> Та же цифра получается и на основании формулы (24), а именно:

$$\frac{191\ 070}{12} = 15\ 923.$$

Определяем количество сухих продуктов сгорания, полученных при сгорании 1 кг топлива, если горение шло с дымом и состав их выражен формулой (138).

Мы уже знаем (см. стр. 46), что при сгорании 1 кг топлива с содержанием  $S\%$  серы, образуется сернистого газа:

$$0,6993 \cdot \frac{S}{100} = \frac{1}{1,43} \cdot \frac{S}{100} \text{ куб. м.}$$

На основании термохимических уравнений (21), (22) и (26) утверждаем, что при сгорании 1 кг углерода образуется одно и то же объемное количество газов, а именно:  $1,867 = \frac{1}{0,5357}$  куб. м (см. стр. 46, 51 и 61), независимо от того, сгорает ли углерод сплошн в углекислый газ, в метан или в окись углерода.

Следовательно, при сгорании 1 кг топлива с содержанием  $C\%$  углерода и при наличии в продуктах сгорания дыма в количестве  $C^A$ , исчисленного в  $\%$  по весу рабочего топлива, количество углекислого газа, метана и окиси углерода определяется в сумме:

$$1,867 \cdot \frac{C - C^A}{100} = \frac{1}{0,5357} \cdot \frac{C - C^A}{100} \text{ куб. м.}$$

Если к этому прибавить и количество сернистого ангидрида, то получим при сгорании 1 кг топлива всего куб. метров сернистого ангидрида, углекислого газа, окиси углерода и метана в сумме:

$$\frac{C - C^A}{0,5357 \cdot 100} + \frac{S}{1,43 \cdot 100} = \frac{C - C^A + 0,375 \cdot S}{53,57} \quad (146)$$

Так как объем сухих продуктов сгорания мы обозначим через  $V_{\text{сг.}}$ , то тот же объем суммы сернистого ангидрида, углекислого газа, метана и окиси углерода может быть выражен формулой:

$$V_{\text{сг.}} \cdot \frac{CO_2 + SO_2 + CO + CH_4}{100}, \quad (146')$$

откуда:

$$V_{\text{сг.}} = \frac{C - C^A + 0,375 \cdot S}{0,5357 \cdot (CO_2 + SO_2 + CO + CH_4)}. \quad (147)$$

Количество водорода, заключенное в продуктах сгорания, полученных из 1 кг топлива, определится в куб. метрах при  $0^\circ\text{C}$  и 760 мм рт. ст. по формуле:

$$\begin{aligned} \frac{H_2}{100} \cdot \frac{C - C^A + 0,375 \cdot S}{0,5357 \cdot (CO_2 + SO_2 + CO + CH_4)} &= \\ &= \frac{H_2 \cdot (C - C^A + 0,375 \cdot S)}{53,57 \cdot (CO_2 + SO_2 + CO + CH_4)}, \end{aligned} \quad (148)$$

НБ  
УДМУНТ  
(ДНТ)



или, умножив на удельный вес 0,09, получим вес водорода в килограммах по формуле:

$$\frac{H_2 \cdot (C - C^A + 0,375 \cdot S)}{595,2 \cdot (CO_2 + SO_2 + CO + CH_4)} \cdot 1) \quad (149)$$

Потеря тепла от наличия в дымовых газах свободного водорода определяется, если мы количество водорода, вычисленное по формуле (149), помножим на 29 030, <sup>2)</sup> что приводит нас к формуле:

$$Q'_3 = 48,77 \cdot \frac{H_2 \cdot (C - C^A + 0,375 \cdot S)}{CO_2 + SO_2 + CO + CH_4} \quad (150)$$

Полная потеря от химической неполноты сгорания 1 кг топлива получается суммированием  $Q'_3$  и  $Q''_3$ , что дает формулу:

$$Q_3 = \frac{56,7 \cdot CO + 159,2 \cdot CH_4}{CO_2 + CO + CH_4} \cdot (C - C^A) + 181 \cdot C^A + \\ + \frac{48,77 \cdot H_2}{CO_2 + SO_2 + CO + CH_4} \cdot (C - C^A + 0,375 \cdot S) \quad (151)$$

При наличии механической потери углерода в шлаках, провале и уносе нужно вместо  $C - C^A$  во всех выше и ниже приведенных в этой главе формулах вставлять:

$$C_c = C - C^A - (C_{шл.} + C_{пр.} + C_{ун.}), \quad (152)$$

где  $C_c$  — количество углерода топлива, пошедшее на образование газов, исчисленное в % от веса рабочего топлива,  $C_{шл.}$ ,  $C_{пр.}$ ,  $C_{ун.}$  — см. стр. 47.

Вес водяных паров в продуктах сгорания, при наличии в них водорода, метана и дыма, определится по следующей формуле:

$$G_{вп.} = 9 \cdot \left[ \frac{H}{100} - (0,09 \cdot H_2 + 0,1789^3) \cdot CH_4 \right] \cdot \frac{C - C^A + 0,375 \cdot S}{53,57 (CO_2 + SO_2 + CO + CH_4)} + \\ + 0,01 W + W_{ф.} + \psi \cdot \alpha \cdot G_0 \cdot 4) \quad (153)$$

<sup>1)</sup> Нужно помнить, что  $H_2$  есть содержание водорода в % по объему сухих газов.

<sup>2)</sup> См. стр. 20.

<sup>3)</sup>  $\frac{4}{16} \cdot 0,7157 = 0,1789$ , где 0,7157 — удельный вес метана, а объяснение коэффициента  $\frac{4}{16}$  см. в формуле (22).

<sup>4)</sup> Напоминаем:  $H$  — содержание водорода в % по весу рабочего топлива,  $H_2$  — содержание водорода в % по объему сухих газов.

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)

Объем водяных паров получим, разделив вес их на 0,8043 или помножив на 1,2433:

$$V_{\text{вл.}} = \frac{G_{\text{вп.}}}{0,8043} = 1,2433 G_{\text{вп.}} \quad (154)$$

Формула (91) сохраняет свою верность и в данном случае:

$$G_{\text{пс.}} = 1 + (1 + \psi) \cdot \alpha \cdot G_0 + W_{\text{ф.}} \quad (91)$$

Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  находится следующим рассуждением.

Не весь кислород  $O_2$  в продуктах сгорания является избыточным, часть его могла бы быть утилизирована на сжигание:

окиси углерода в количестве	$\frac{CO}{2}$
водорода	$\frac{H_2}{2}$
метана	$2 \cdot CH_4$

и кроме того на сжигание сажи ( $C^A$ ) потребуется кислорода  $\frac{8}{3} \cdot \frac{C^A}{100}$  кг, или  $0,7 \frac{8}{3} \cdot \frac{C^A}{100} = 1,867 \frac{C^A}{100}$  куб. м, что составит на каждые 100 куб. м сухих продуктов сгорания:

$$\left[ \left( 1,867 \cdot \frac{C^A}{100} \right) : \frac{C - C^A + 0,375 \cdot S}{0,5357 \cdot (CO_2 + SO_2 + CO + CH_4)} \right] \cdot 100 =$$

$$= \frac{C^A}{C - C^A + 0,375 \cdot S} \cdot (CO_2 + SO_2 + CO + CH_4) \text{ куб. м.}$$

След. избыточного кислорода в 100 куб. м сухих газов будет:

$$O_2 = \left[ \frac{CO}{2} + \frac{H_2}{2} + 2 \cdot CH_4 + \frac{C^A \cdot (CO_2 + SO_2 + CO + CH_4)}{C - C^A + 0,375 \cdot S} \right] \quad (155)$$

Умножим эту разность на отношение  $\frac{79,1}{20,9} = 3,785$ , получим избыточный азот; поэтому для определения коэффициента избытка воздуха в данном случае будем иметь формулу:

$$\alpha = \frac{N_2}{N_2 - 3,785 \cdot \left[ O_2 - 0,5 \cdot (CO + H_2) - 2 \cdot CH_4 - \frac{C^A \cdot (CO_2 + SO_2 + CO + CH_4)}{C - C^A + 0,375 \cdot S} \right]} \quad (156)$$

При отсутствии в продуктах сгорания метана, водорода и дыма, когда  $H_2 = CH_4 = C^A =$  нулю, получаем формулу (127), а при отсутствии и окиси углерода, когда  $CO = H_2 = CH_4 = C^A =$  нулю, получаем формулу (75).

Количество кислорода, пошедшее на сгорание водорода 1 кг топлива, определится следующим выражением в килограммах.<sup>1)</sup>

$$8 \cdot \left[ \frac{H - \frac{O}{8}}{100} - (0,09 \cdot H_2 + 0,1789 \cdot CH_4) \cdot \frac{C - C^A + 0,375 \cdot S}{53,57 \cdot (CO_2 + SO_2 + CO + CH_4)} \right] \quad (157)$$

или, пересчитывая это количество на объем и отнеся его к 100 куб. м сухих газов,<sup>2)</sup> получим:

$$\left\{ 0,7 \cdot 8 \cdot \left[ \frac{H - 0,125 \cdot O}{100} - (0,09 \cdot H_2 + 0,1789 \cdot CH_4) \times \right. \right. \\ \left. \times \frac{C - C^A + 0,375 \cdot S}{53,57 \cdot (CO_2 + SO_2 + CO + CH_4)} \right] : \frac{C - C^A + 0,375 \cdot S}{0,5357 \cdot (CO_2 + SO_2 + CO + CH_4)} \left. \right\} \cdot 100 = \\ = 5,6 \cdot \left[ H - 0,125 \cdot O - (0,09 \cdot H_2 + 0,1789 \cdot CH_4) \times \right. \\ \left. \times \frac{C - C^A + 0,375 \cdot S}{0,5357 \cdot (CO_2 + SO_2 + CO + CH_4)} \right] \cdot \frac{0,5357 \cdot (CO_2 + SO_2 + CO + CH_4)}{C - C^A + 0,375 \cdot S} \quad (158)$$

Поэтому количество азота  $N_2$ , находящееся в 100 куб. м сухих продуктов сгорания, может быть выражено равенством:

$$N_2 = \frac{79,1}{20,9} \cdot \left\{ CO_2 + SO_2 + 0,5 \cdot CO + O_2 + 5,6 \left[ H - 0,125 \cdot O - \right. \right. \\ \left. \left. - (0,09 \cdot H_2 + 0,1789 \cdot CH_4) \cdot \frac{C - C^A + 0,375 \cdot S}{0,5357 \cdot (CO_2 + SO_2 + CO + CH_4)} \right] \times \right. \\ \left. \times \frac{0,5357 \cdot (CO_2 + SO_2 + CO + CH_4)}{C - C^A + 0,375 \cdot S} \right\} \quad (159)$$

Подставляя  $N_2$  в формулу (138) и умножая обе части равенства на отношение  $\frac{20,9}{100}$ , получим:

$$20,9 = 0,209 \cdot (CO_2 + SO_2 + O_2 + CO + H_2 + CH_4) + \\ + 0,791 \cdot (CO_2 + SO_2 + 0,5 \cdot CO + O_2) + \\ + 0,791 \cdot 5,6 \cdot 0,5357 \cdot \frac{H - 0,125 \cdot O}{C - C^A + 0,375 \cdot S} \cdot (CO_2 + SO_2 + CO + CH_4) - \\ - 0,791 \cdot 5,6 \cdot (0,09 \cdot H_2 + 0,1789 \cdot CH_4) \quad (160)$$

Заметим, что  $0,791 \cdot 5,6 \cdot 0,5357 = 0,791 \cdot 0,7 \cdot 8 \cdot \frac{12 \cdot 1,9643}{44} = 2,373$ ; обозначая через

$$\beta_1 = 2,373 \cdot \frac{H - 0,125 \cdot O}{C - C^A + 0,375 \cdot S} \quad (161)$$

<sup>1)</sup> См. формулу (153).

<sup>2)</sup> См. формулу (147).

и сделав необходимые преобразования, получим:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 = 20,9 - \beta_1 \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2) - (0,6045 + \beta_1) \cdot \text{CO} + \\ + (0,5835 - \beta_1) \cdot \text{CH}_4 + 0,1897 \text{ H}_2. \end{aligned} \quad (162)$$

При отсутствии дыма в продуктах сгорания ( $\text{C}^A = \text{нулю}$ ) формула (161) обращается в формулу (70):

$$\beta = 2,373 \cdot \frac{\text{H} - 0,125 \cdot \text{O}}{\text{C} + 0,375 \cdot \text{S}}, \quad (70)$$

а формула (162) принимает вид:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 = 20,9 - \beta \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2) - (0,6045 + \beta) \cdot \text{CO} + \\ + (0,5835 - \beta) \text{ CH}_4 + 0,1897 \text{ H}_2 \end{aligned} \quad (163)$$

Вспоминая формулу (72), которая имеет место при полном сгорании топлива:

$$\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 = 20,9 - \beta \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2) \quad (72)$$

и сопоставляя ее с формулой (163), имеющей место при наличии в продуктах сгорания окиси углерода, метана и водорода, но при отсутствии дыма, замечаем, что равенство (72) может быть удовлетворено не только при полном сгорании топлива, когда  $\text{CO} = \text{CH}_4 = \text{H}_2 = \text{нулю}$ , но оно удовлетворяется и при неполном сгорании, когда:

$$(0,6045 + \beta) \cdot \text{CO} = (0,5835 - \beta) \cdot \text{CH}_4 + 0,1897 \text{ H}_2 \dots (164)$$

Поэтому, строго говоря, анализа дымовых газов только на  $(\text{CO}_2 + \text{SO}_2)$  и  $(\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2)$  недостаточно даже при полном сгорании.<sup>1)</sup>

Определяя же окись углерода при неполном сгорании по формуле (123), мы легко можем преуменьшить содержание CO в продуктах сгорания [ср. формулы (123) и (163)], а следовательно, преуменьшим и потерю от химической неполноты сгорания (см. формулу 110).

Вопрос еще более усложняется при контроле работы ручных топок с периодической загрузкой топлива. В этом случае сама величина  $\beta$ , которую мы определяем по среднему составу сгораемого топлива, в каждый данный момент меняется, ибо составные

<sup>1)</sup> Ибо нет положительных данных, доказывающих, что оно полное.

УДУНТ  
(ДИТ)

части топлива неодинаково быстро выгорают. Только взятые правильно и в достаточном количестве пробы продуктов сгорания при внимательном отборе средней пробы сжигаемого топлива могут дать цифры, годные для заключения о качестве сгорания и количестве потерь.

Полный анализ дымовых газов с их дожиганием для определения содержания в них окиси углерода, водорода, метана и тяжелых углеводородов весьма кропотлив и обычно в практике котельных установок не применяется. Наличие дыма (сажи), сравнительно легко констатируемое качественно, также требует большой внимательности при определении содержания в нем количества углерода.

В виду всего сказанного, обычно довольствуются при исследованиях дымовых газов в котельных установках определением содержания в них суммы углекислого газа и сернистого ангидрида (которую весьма часто к тому же считают всю за углекислый газ) и количества кислорода. Содержание же окиси углерода подсчитывают по формуле (123), учитывая, конечно, все ранее сказанное об изменчивости коэффициента  $\beta$  при периодической загрузке топлива.<sup>1)</sup>

На стр. 38 мы указали, что коэффициент  $\beta$ , определяемый по формуле (70), зависит только от химического состава топлива. Из формулы (161) видим, что коэффициент  $\beta_1$  при наличии дыма зависит уже и от количества углерода, заключенного в саже. Ясно, что и количество горючих элементов, пропадающих в шлаках, провале и уносе, где содержится углерод ( $C_{шл.} + C_{пр.} + C_{ун.}$ ), исчисленный в % от веса рабочего топлива, также будет влиять на величину коэффициента  $\beta$ , вычисляемого обычно из формулы (70) по количеству углерода в топливе. Поправка может быть легко введена, если вместо  $C$  в формуле (70) мы будем вводить:

$$C_c = C - (C_{шл.} + C_{пр.} + C_{ун.}), \quad (100)$$

а вместо  $C - C^A$  в формулу (161) будем вводить:

$$C_c = C - C^A - (C_{шл.} + C_{пр.} + C_{ун.}). \quad (152)$$

<sup>1)</sup> Выбор места для забора пробы также играет весьма большое значение, особенно при больших размерах газоходов. Это обстоятельство, к сожалению, недостаточно учитывается и потому нуждается в напоминании.

УДКУНТ  
(ДНТ)

## ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРИ ОТ МЕХАНИЧЕСКОЙ НЕПОЛНОТЫ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА.

Под механической неполнотой сгорания топлива ( $Q_4$ ) понимается потеря тепла от провала несгоревшего топлива под колосники (в зольник), от уноса мелочи в газоходы, где она гореть нормально не может, от выгреба несгоревшего топлива при чистке топки и т. д.

Выражая потерю от механической неполноты сгорания или от «механического недожега» в % от теплопроизводительности рабочего топлива и обозначая через  $q_4$ , имеем:

$$q_4 = \frac{100 \cdot Q_4}{Q_{\text{раб.}}} \quad (165)$$

Величина  $q_4$  зависит от конструкции топки, комбинирования ее с котлом, величины напряжения колосниковой решетки и зеркала горения, от характера топлива, шлака, силы дутья и тяги, а также в значительной степени от работы кочегара и многих других, трудно поддающихся учету, причин.

При хороших, но еще достижимых на практике, условиях работы кочегара при нормальных напряжениях решетки и при правильной конструкции топки можно принимать для  $q_4$  величины, указанные в таблице 11 (см. 70 стр.).<sup>1)</sup>

Необходимо иметь в виду, что при работе котлов с сильно колеблющейся нагрузкой и частыми перерывами в снабжении паром производства величина  $q_4$  может возрасти, особенно для шахтных и цепных топок, что необходимо иметь в виду при расчете себестоимости пара.

Определяя потерю тепла от механической неполноты сгорания топлива, обычно считают, что потеря эта состоит из тепла углерода, пропадающего в шлаках, провале и уносе.

Ранее мы уже пользовались обозначением  $C_{\text{шл.}}$ ,  $C_{\text{пр.}}$ ,  $C_{\text{ун.}}$ , понимая под ними количество углерода в шлаках, провале и уносе,

<sup>1)</sup> Сколь велики при неблагоприятных условиях работы могут быть потери от механического недожега в шлаках, провале и уносе, свидетельствует пример сжигания подмосковного угля на цепных решетках в опытах Теплотехнического Института на Каширской Электростанции, где  $q_4$  доходило до 37,3%. [См. Известия Теплотехнического Института за 1925 год, № 5 (7), стр. 58.]

ТАБЛИЦА 11.

Род топки и способ ее обслуживания	$q_4$ в %
Колосниковая решетка с ручной чисткой и большим живым сечением .	2—4
Колосниковая решетка с ручной чисткой и малым живым сечением .	1—3
Колосниковая решетка с ручной чисткой и малым живым сечением при очень мелком топливе .	3—5
Механические топки с подвижными колосниками .	1—3
Шахтная топка для торфа .	1—2
Шахтная топка для дров .	0—1
Нефтяные остатки, газ (при правильной конструкции форсунки и при правильном ее монтаже) .	0
Сжигание пылевидного топлива (в зависимости от способа подачи топлива в топку и силы тяги) .	2 и более.

приходящееся (в процентах) на 1 кг топлива, заброшенного в топку; следовательно, потеря тепла от механической неполноты сгорания, отнесенная к 1 кг заброшенного в топку топлива, в свою очередь, определится по формуле:

$$Q_4 = 81 \cdot (C_{шл.} + C_{пр.} + C_{ун.}) \quad (166)$$

Если обозначить содержание углерода в процентах по весу сухого шлака, провала и уноса в сумме через  $C_4$  и считать, что водород и сера успели выгореть, то потеря тепла от механической неполноты сгорания топлива найдется следующим рассуждением.

Пусть  $G_4$  кг — вес сухого вещества всей механической потери (шлак + провал + унос), приходящейся на 1 кг сожженного топлива с зольностью  $A\%$ , тогда:

$$G_4 = \frac{A}{100} + \frac{C_4}{100} \cdot G_4, \quad (167)$$

откуда

$$G_4 = \frac{A}{100 - C_4} \quad (168)$$

и, следовательно:

$$\frac{C_{шл.} + C_{пр.} + C_{ун.}}{100} = \frac{C_4}{100} \cdot G_4 = \frac{C_4}{100} \cdot \frac{A}{100 - C_4}; \quad (169)$$

$$C_{шл.} + C_{пр.} + C_{ун.} = \frac{C_4 \cdot A}{100 - C_4}, \quad (170)$$

УЧУНТ  
(ДІІТ)

а потому:

$$Q_4 = \frac{81 \cdot C_4 \cdot A}{100 - C_4} \quad (171)$$

$$q_4 = \frac{8100 \cdot C_4 \cdot A}{(100 - C_4) \cdot Q_{\text{раб.}}} \quad (172)$$

Пренебрегая потерей от уноса и принимая, по примеру проф. В. Н. Шретер, среднюю температуру, при которой выгребаются шлаки, равной  $600^\circ \text{C}$ ,<sup>1)</sup> а среднюю их теплоемкость  $= 0,2 \text{ кал/кг}^\circ \text{C}$ , можно подсчитать потерю тепла от охлаждения шлаков при выгребе,  $Q'_4$  калорий на 1 кг сожженного топлива или  $q'_4$  в % от рабочей теплопроизводительности топлива по следующим формулам:

$$Q'_4 = 0,2 \cdot 600 \cdot \frac{A}{(100 - C_4)} = 120 \cdot \frac{A}{100 - C_4}; \quad (173)$$

$$q'_4 = \frac{120 \cdot A \cdot 100}{(100 - C_4) \cdot Q_{\text{раб.}}} = \frac{12000 \cdot A}{(100 - C_4) \cdot Q_{\text{раб.}}} \quad (174)$$

Следовательно суммарная потеря тепла от механической неполноты сгорания может быть исчислена при выгребе горячих шлаков по следующим формулам:

$$Q_4 + Q'_4 = \frac{(81 \cdot C_4 + 120) \cdot A}{100 - C_4}; \quad (175)$$

$$q_4 + q'_4 = \frac{(8100 \cdot C_4 + 12000) \cdot A}{(100 - C_4) \cdot Q_{\text{раб.}}} \quad (176)$$

При точных исследованиях стремятся непосредственным взвешиванием определить отдельно шлаки, провал и унос и затем или прокаливанием средних проб определить содержание в них углерода или же калориметрированием средних проб определить их теплопроизводительность. Наиболее распространен первый способ — считать по углероду. Второй способ не пользуется доверием в виду трудности оперировать в лаборатории при калориметрировании составных горючих с весьма малой их теплопроизводительностью.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Проф. В. Н. Шретер, «Паровые котлы в тепловых расчетах и цифрах». Ленинград 1924 г., 14 стр.

<sup>2)</sup> Мною неоднократно давались средние пробы шлака для определения в них содержания углерода с одновременным требованием произвести и калориметрирование.

Подсчет потери тепла по первому и второму способу нередко различается весьма значительно.



Мы имеем здесь в виду привычную нам работу с хорошим относительно выжиганием шлаков.

Когда же шлак, провал и унос получаютя столь недожженными, как это имело место в опытах Теплотехнического института с подмосковным углем на Каширской электростанции,<sup>1)</sup> где теплопроизводительность шлака и провала, определенная по бомбе, дала следующие цифры:

при холодном дутье:

для шлака	от 1370	до 2503	кал/кг
» провала	» 2187	3083	

при горячем дутье:

для шлака	от 711	до 1836	кал/кг
провала	» 770	» 2136	

то определение потери тепла от механического недожега по калориметру является не только допустимым, но и более надежным, ибо в данном случае помимо углерода мы имеем в шлаках, и особенно в провале, водород и другие горючие.

Указать точно, когда нужно доверять первому способу и когда второму, в настоящее время не представляется возможным, и это одна из многочисленных задач для химических лабораторий по анализу топлива.

Помимо отмеченного, необходимо еще указать на исключительную трудность правильного отбора средней пробы шлаков, особенно когда берется общая средняя проба шлака, провала и уноса.

*Пример 13.* В топке сжигался антрацит марки АП с содержанием углерода 85,86%, водорода 1,75%, кислорода и азота 1,16%, золы 4,89%, серы 1,57% и влаги 4,77%, с рабочей теплопроизводительностью (по бомбе)

В качестве примера позволю себе привести здесь анализ шлака, произведенный особо тщательно по моей просьбе в химической лаборатории Московского высшего технического училища 13 апреля 1926 года, который показал:

содержание углерода	0,75%
влаги	нуль
серы.	0,80%

теплотворная способность шлака по калориметру 136 кал/кг.

Расхождение, как легко убедиться, достаточно разительно.

<sup>1)</sup> См. «Известия Теплотехнического института» за 1925 г., № 5 (7) стр. 54 — 83.

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)

7263 кал/кг. Количество углерода, не сгоревшего в шлаках и провале, оказалось 32%. Пренебрегая уносом,<sup>1)</sup> определить потерю от механической неполноты сгорания.

*Решение.* По формуле (171) находим:

$$Q_4 = \frac{81 \cdot 32 \cdot 4,89}{100 - 32} = 186,4 \text{ кал на 1 кг сожженного топлива. (171')}$$

По формуле (172)

$$q_4 = \frac{8100 \cdot 32 \cdot 4,89}{(100 - 32) \cdot 7263} = 2,67\% . (172')$$

По формуле (173) определим потерю от охлаждения шлаков:

$$Q'_4 = 120 \cdot \frac{4,89}{100 - 32} = 8,63 \text{ кал. на 1 кг сожженного топлива, или по фор-}$$

муле (174):

$$q'_4 = \frac{12000 \cdot 4,89}{(100 - 32) \cdot 7263} = 0,12\% . (174')$$

Итак:

$$Q_4 + Q'_4 = 195 \text{ кал.};$$

$$q_4 + q'_4 = 2,79\% .$$

## ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРИ В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ.

Потери в окружающую среду через лучеиспускание и конвекцию, отнесенные к 1 кг сожженного топлива,  $Q_5$  кал. зависят от системы котла, его размеров, напряжения поверхности нагрева, конструкции обмуровки, взаимного расположения толки, котла, пароперегревателя и экономайзера, условий вентиляции котельной, температуры воздуха в котельной и т. д.

Произвести точный подсчет отдачи тепла обмуровкой и прочими поверхностями в окружающую среду крайне затруднительно не только потому, что размеры этих поверхностей выясняются лишь в конце проекта, но и потому, что нет возможности учесть

<sup>1)</sup> В стационарных установках с достаточными размерами топочного пространства при нефорсированной нагрузке и умеренной тяге ошибка от пренебрежения углеродом в уносе ничтожна, в виду малого, сравнительно, его количества. В паровозах, где в качестве тягового аппарата пользуются конусом, унос несгоревшего углерода в дымовую коробку и отчасти в дымовую трубу достигает нередко весьма значительных величин, пренебрегать которыми не рекомендуется.

целый ряд случайных причин, влияющих на охлаждение кладки при практических условиях работы в котельной.

Поэтому при расчете котельной, вновь проектируемой, пользуются опытными данными над аналогичными устройствами.

Выразим  $Q_5$  в процентах от рабочей теплопроизводительности топлива  $Q_{\text{раб.}}$  и обозначим эту величину через  $q_5$ ; тогда

$$q_5 = \frac{100 \cdot Q_5}{Q_{\text{раб.}}} \quad (177)$$

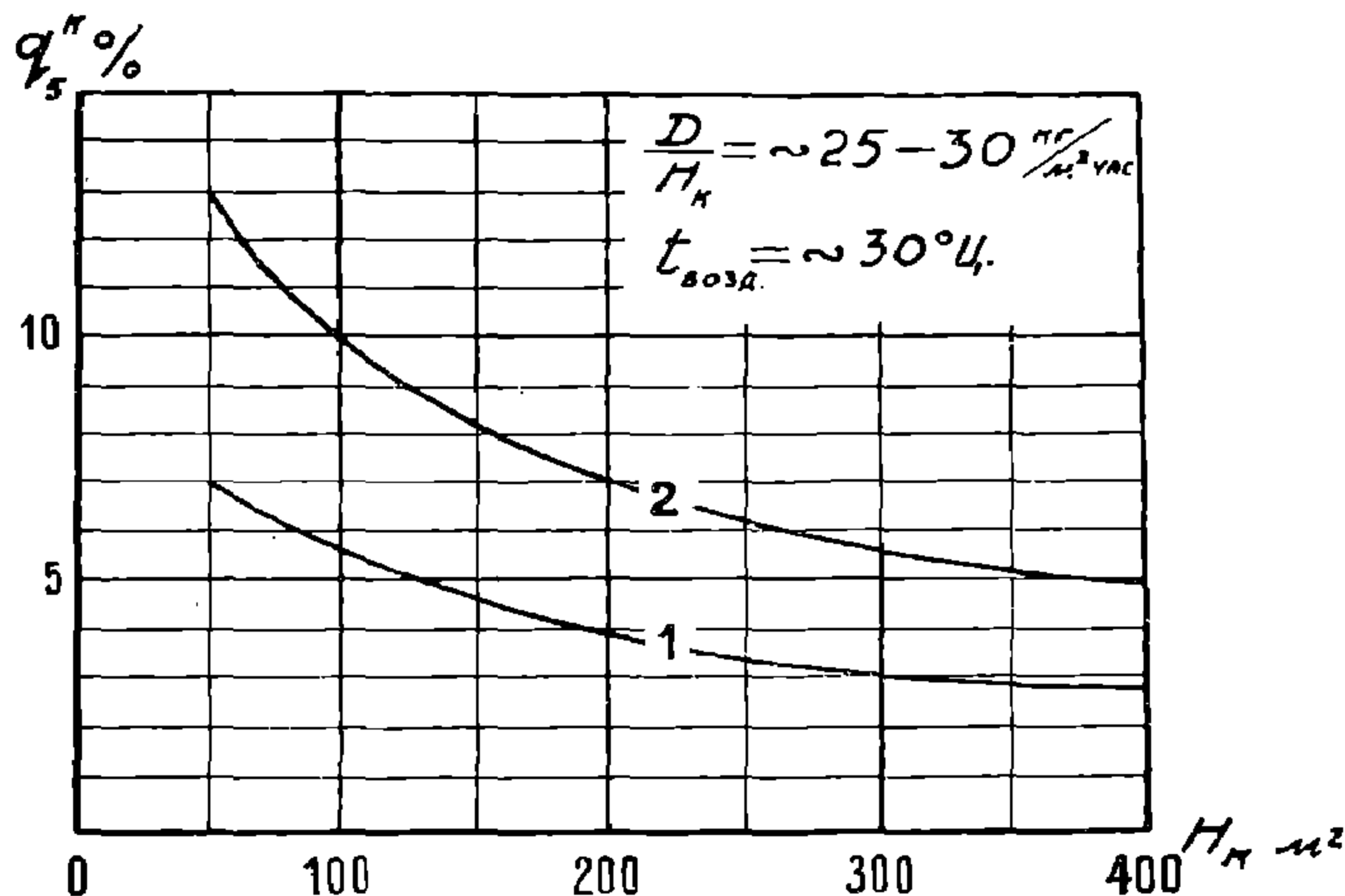
Как первое приближение при температуре воздуха в котельной около  $30^\circ \text{C}$  и при практически встречающихся напряжениях поверхности нагрева котла от 15 до 30 кг с 1 кв. м в час можно задаваться следующими величинами потерь в окружающую среду:

ТАБЛИЦА 12.

Наименование типа котла и топки	Потеря топкой $q_5^{\text{т.}}$	Потеря котлом		Потеря паропере- гревателем $q_5^{\text{пе.}}$
		При ры- ночной обмуровке $q_5^{\text{к.}}$	При очень хорошей обмуровке $q_5^{\text{к.}}$	
Жаротрубные и комбинирован- ные котлы с внутренней топкой.	0,5—3	7—8	3—4	0,5—2
Жаротрубные и комбинирован- ные котлы с шахтной топкой.	4—6	8—9	6—7	0,5—2
Батарейные и цилиндрические котлы с внешней топкой.	2—5	7—10	4—5	0—2
Горизонтально водотрубные котлы при напряжениях по- верхности нагрева $\frac{D}{H_{\text{к.}}} = 25—30 \text{ кг/кв. м в час.}$	2—4	4—8	2—5	0—0,5
Вертикально-водотрубные кот- лы при напряжениях поверх- ности нагрева около 35 кг/кв. м в час.	1—4	4—7	2—4	0—0,5
<i>Примечание.</i> $q_5^{\text{к.}}$ включает потерю топкой $q_5^{\text{т.}}$				
Потеря экономайзером Грина $q_5^{\text{эк.}} = 1—2\%$ .				
Каблица $q_5^{\text{эк.}} = 0,5—1\%$ .				

Влияние размеров котла на величину потери  $q_5^{\text{к.}}$  до некоторой степени выясняется для горизонтально-водотрубных котлов, обму-

рованных попарно, при напряжении их 25—30 кг с 1 кв. м в час и температуре воздуха в котельной около 30° С следующим графиком, где кривая (1) относится к случаю очень хорошей обмуровки котла, а кривая (2) — к рыночной обмуровке котла.



Фиг. 4. Характер зависимости потери тепла в окружающую среду от размера поверхности нагрева котла (для горизонтально-водотрубных котлов). 1 — при очень хорошей обмуровке. 2 — при рыночной обмуровке.

Из рассмотрения приведенного графика видно, что с увеличением поверхности нагрева котла потеря тепла в окружающую среду, отнесенная к рабочей теплотеплопроизводительности 1 кг топлива, весьма значительно уменьшается. В том же направлении сказывается и увеличение напряженности поверхности нагрева.

### ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ.

## ПРИСОС ВОЗДУХА В ГАЗОХОДАХ И ЕГО ВЕЛИЧИНА.

Мы уже знаем, что сгорание топлива в топке практически требует больше воздуха, чем то следует по подсчету, и происходит с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha_r > 1$ .

По выходе из топки газы направляются в газоходы, в которых обычно поддерживается разрежение, а следовательно, может иметь, и практически имеет, место присос воздуха через кладку, через щели в заслонках и прочих местах, где поддерживать герметичность крайне затруднительно.

УДУНТ  
(ДИТ)

Присасываемый в газоходах воздух увеличивает коэффициент избытка воздуха и приносит лишь вред.

Величина присоса ( $\Delta\alpha$ ) зависит от размеров кладки, ее плотности, величины разрежений в газоходах и от многих других факторов.

При правильной конструкции (небольшие борова, плотные заслонки и пр.) и при хорошей эксплуатации (отсутствие трещин в кладке, промазывание окон для чистки и т. д.) можно считать, что для «нормальных» напряжений котлов:

1) присос в газоходах котла и пароперегревателя колеблется от 0,05 до 0,2 в зависимости от расположения пароперегревателя и конструкции обмуровки;

2) присос в борове между котлом и экономайзером можно считать от 0,05 до 0,3, при чем при неплотных задвижках он в сильной степени зависит от числа неработающих котлов;

3) присос в экономайзере определяется от 0,05 до 0,2 в зависимости от типа экономайзеров, его размеров и способа очистки от золы.

Обозначая коэффициент избытка воздуха в топке, за котлом, при входе в экономайзер и при выходе из него соответственно через  $\alpha_{т.}$ ,  $\alpha_{к.}$ ,  $\alpha'_{э.}$  и  $\alpha''_{э.}$  будем иметь:

$$\alpha_{к.} = \alpha_{т.} + (\text{от } 0,05 \text{ до } 0,2); \quad (178)$$

$$\alpha'_{э.} = \alpha_{к.} + (\text{от } 0 \text{ до } 0,3), \quad (179)$$

где нуль, т.-е.  $\alpha'_{э.} = \alpha_{к.}$ , отвечает случаю отсутствия промежуточного борова и регистра между котлом и экономайзером.

$$\alpha'_{э.} = \alpha_{т.} + (\text{от } 0,05 \text{ до } 0,5); \quad (180)$$

$$\alpha''_{э.} = \alpha'_{э.} + (\text{от } 0,05 \text{ до } 0,2); \quad (181)$$

$$\alpha''_{э.} = \alpha_{т.} + (\text{от } 0,10 \text{ до } 0,70) \quad (182)$$

При уменьшении или увеличении нагрузки котла присос соответственно уменьшается или увеличивается.

Профессор К. В. Кирш считал, что при уменьшении (увеличении) нагрузки на 30% присос соответственно уменьшается (увеличивается) от 30 до 50%.

Руководствуясь вышеизложенным и учитывая конструкцию обмуровки, заслонок и пр., задаются величиной коэффициента избытка воздуха в топке ( $\alpha_{т.}$ ), за котлом ( $\alpha_{к.}$ ), перед экономай-

зером ( $\alpha'_a$ ) и за экономайзером ( $\alpha''_a$ ), а затем уже определяют состав сухих дымовых газов, решая совместно систему уравнений (78), если горение предположено полным, и систему уравнений (131), если в продуктах сгорания ожидают присутствие окиси углерода.

При опытных исследованиях существующих установок коэффициент избытка воздуха подсчитывается по одной из формул (75), (127) и (156), в зависимости от результатов химического анализа продуктов сгорания.

Количество тепла, внесенное с воздухом, присосанным в газоходы, и приходящееся на 1 кг сожженного топлива, учитывается в уравнении теплового баланса (см. формулы 1 и 3) членом  $Q_{пр}$  калорий и может быть подсчитано по формуле (204).<sup>1)</sup>

Когда сгорание полностью закончилось в топочном пространстве и догорание в газоходах места не имело, то присос воздуха лишь разжижает продукты сгорания, не меняя их абсолютного состава, но увеличивая непроизводительно их количество. Когда же сгорание в топочном пространстве проходило не до конца, что часто можно наблюдать в газовых топках при недостаточном избытке воздуха или при неудачно спроектированном топочном пространстве, то присос воздуха, при благоприятных температурах в газоходах или при наличии случайного воспламенителя (искра), может послужить причиной возгорания ранее недогоревших газов; в этом случае, конечно, последует изменение не только процентного состава дымовых газов за счет некоторого разжижения их избытком воздуха, но изменится также и абсолютный состав их.

Явления догорания газов в газоходах признаются в котельных установках ненормальными и вредными, опасными нередко для целостности установки.

Поэтому принимаются все меры к тому, чтобы сгорание было закончено в топочном пространстве, что и считается как обязательное задание при проектировании.<sup>2)</sup>

---

<sup>1)</sup> См. стр. 90.

<sup>2)</sup> См. также стр. 56.

## ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРИ ТЕПЛА С УХОДЯЩИМИ  
ГАЗАМИ.

Потеря тепла с уходящими газами, оставляющими котельную при температуре  $T^{\circ}\text{C}$ , зависит прежде всего от этой последней, затем от количества уходящих газов и их теплоемкости и может быть вычислена по следующей формуле:

$$\begin{aligned} Q_2 &= V_{\text{сг.}} \cdot C_{\text{сг.}} \cdot T + G_{\text{вп.}} \cdot C_{\text{вп.}} \cdot T = \\ &= (V_{\text{сг.}} \cdot C_{\text{сг.}} + G_{\text{вп.}} \cdot C_{\text{вп.}}) \cdot T, \end{aligned} \quad (183)$$

где:

$C_{\text{сг.}}$  — средняя теплоемкость 1 куб. м сухих газов при постоянном давлении<sup>1)</sup> в  $\text{кал}/\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$  (см. формулу 184);

$C_{\text{вп.}}$  — средняя теплоемкость 1 кг водяных паров в  $\text{кал}/\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$  (см. формулу 185).

Вычисление объема сухих газов  $V_{\text{сг.}}$ , полученных при сгорании 1 кг топлива, ведется по одной из формул: (96) или (133) в зависимости от того, имеется или не имеется окись углерода в дымовых газах, а вычисление веса водяных паров  $G_{\text{вп.}}$ , полученных при сгорании 1 кг топлива, ведется по формуле (92).

Для подсчета средних теплоемкостей можно пользоваться формулами, предложенными проф. И. В. Арбатским:

$$C_{\text{сг.}} = 0,314 + 0,00003 \cdot T; \quad (184)^1$$

$$C_{\text{вп.}} = 0,45 + 0,00005 \cdot T. \quad (185)^2$$

Формула (184) дает среднюю теплоемкость сухих дымовых газов (в  $\text{кал}/\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$ )<sup>3)</sup> при нагреве их от  $0^{\circ}$  до  $T^{\circ}\text{C}$  с достаточной практически точностью, ибо при содержании  $\text{CO}_2$  в дымовых газах около 10% она ошибки не дает, а при изменении  $\text{CO}_2$  от 5 до 15% ошибка равна  $\pm 3\%$ .

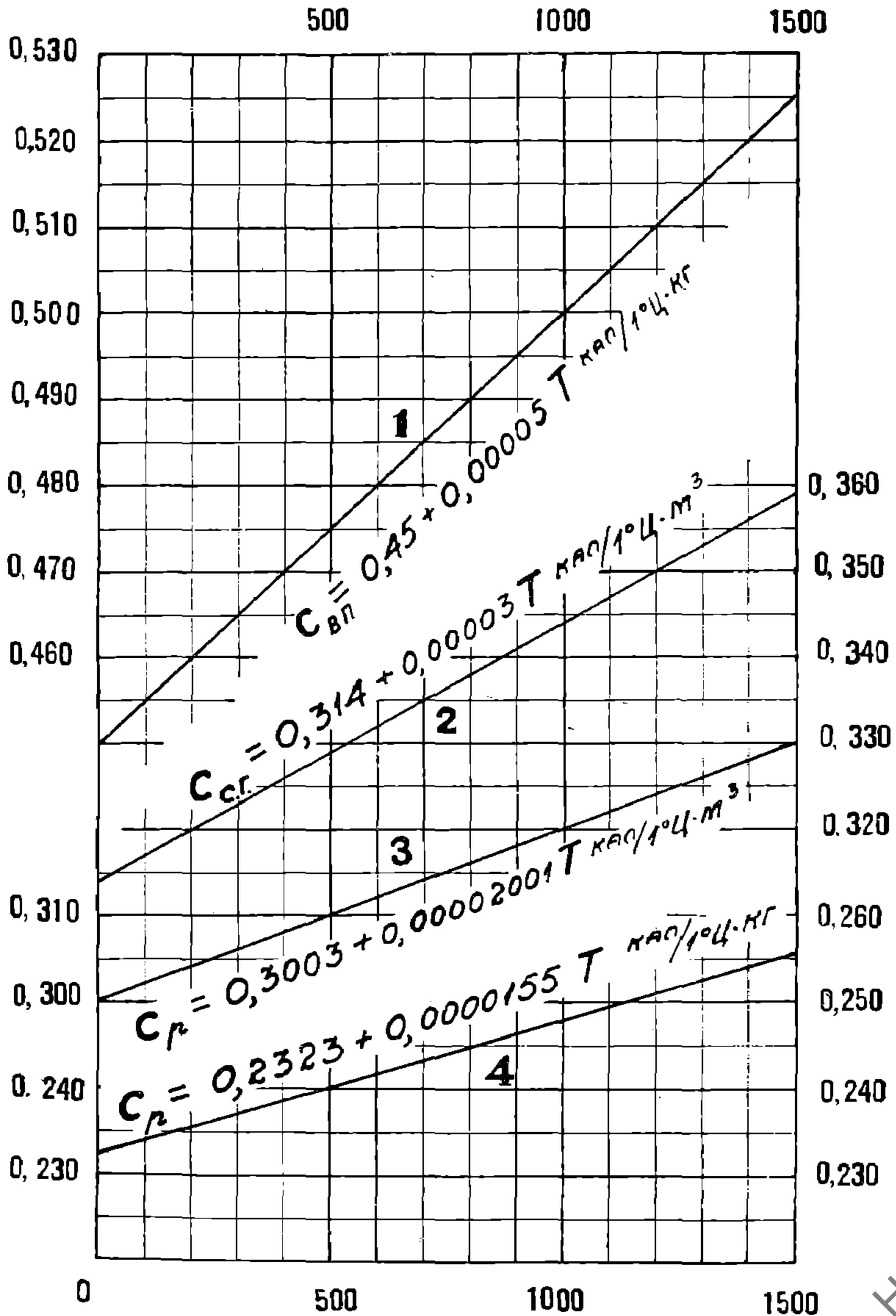
Фиг. 5 дает графическую зависимость средней теплоемкости от температуры.

<sup>1)</sup> См. «Известия механического института МВТУ.» Москва. 1909, выпуск VI, стр. 3.

<sup>2)</sup> См. статью проф. И. В. Арбатского в «Бюллетенях Политехнического Общества» за 1913 г., № 3, стр. 120 — 132.

<sup>3)</sup> Имеется в виду объем газов, приведенный к  $0^{\circ}\text{C}$  и 760 мм рт. ст.; эту величину и дают формулы (96) и (133).

Подробный подсчет потерь по составу газов, принимая во внимание для каждого газа его теплоемкость, занимает лишь больше времени, но никаких трудностей не представляет, ибо, зная объем сухих газов (см. формулу 133) и состав газов в % по объему их



Фиг. 5. Зависимость средней теплоемкости от температуры для водяных паров, сухих дымовых газов и воздуха.

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)



легко определить величину каждого слагаемого; зная же среднюю теплоемкость каждого газа в отдельности — найти затем более точно, чем то дает формула (184), среднюю теплоемкость 1 куб. м сухих газов, пользуясь следующей формулой:

$$C_{\text{ср.}} = 0,01 \cdot [CO_2 \cdot C_{CO_2} + SO_2 \cdot C_{SO_2} + CO \cdot C_{CO} + O_2 \cdot C_{O_2} + N_2 \cdot C_{N_2}], \quad (186)$$

где  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $CO$ ,  $O_2$ ,  $N_2$  — содержание углекислого газа, сернистого ангидрида, окиси углерода, кислорода и азота в % по объему сухих газов, а  $C_{CO_2}$ ,  $C_{SO_2}$ ,  $C_{CO}$ ,  $C_{O_2}$  и  $C_{N_2}$  соответственно — средняя теплоемкость углекислого газа, сернистого ангидрида, окиси углерода, кислорода и азота.

Для подсчета средних теплоемкостей в последнем случае воспользуемся следующими формулами:

$$C_{CO_2} = 0,3948 + 0,0001457 \cdot T - 0,00000003536 \cdot T^2 \quad (187)$$

$$C_{SO_2} = 0,3922 + 0,0001473 \cdot T - 0,00000004241 \cdot T^2 + \\ + 0,0000000000004464 \cdot T^3 \quad (188)$$

$$C_{CO} = 0,2984 + 0,0000201 \cdot T \quad (189)$$

$$C_{O_2} = 0,3074 + 0,0000201 \cdot T \quad (190)$$

$$C_{N_2} = 0,2984 + 0,0000201 \cdot T \quad (191)$$

На фиг. 6 представлена в масштабе зависимость средней теплоемкости от температуры, при чем кривая (1) относится к углекислому газу (но ею же можно пользоваться и для сернистого ангидрида),<sup>1)</sup> прямая (2) дает зависимость для кислорода, а прямая (3) — для азота и окиси углерода.

Если газы оставляют котельную при температуре  $T_y$ , °С, то на основании формул (92), (133) и (183) имеем:

$$Q_2 = \left[ \frac{(C + 0,375 \cdot S) \cdot C_{\text{ср.}}}{0,5357 \cdot (CO_2 + SO_2 + CO)_y} + \right. \\ \left. + \left( \frac{9 \cdot H + W}{100} + W_{\text{ф.}} + \psi \cdot \alpha \cdot G_0 \right) \cdot C_{\text{вп.}} \right] \cdot T_y, \quad (192)$$

где индекс  $y$  в знаменателе указывает на то, что величины  $CO_2$ ,  $SO_2$  и  $CO$  берутся на основании анализа уходящих дымовых газов.<sup>2)</sup>

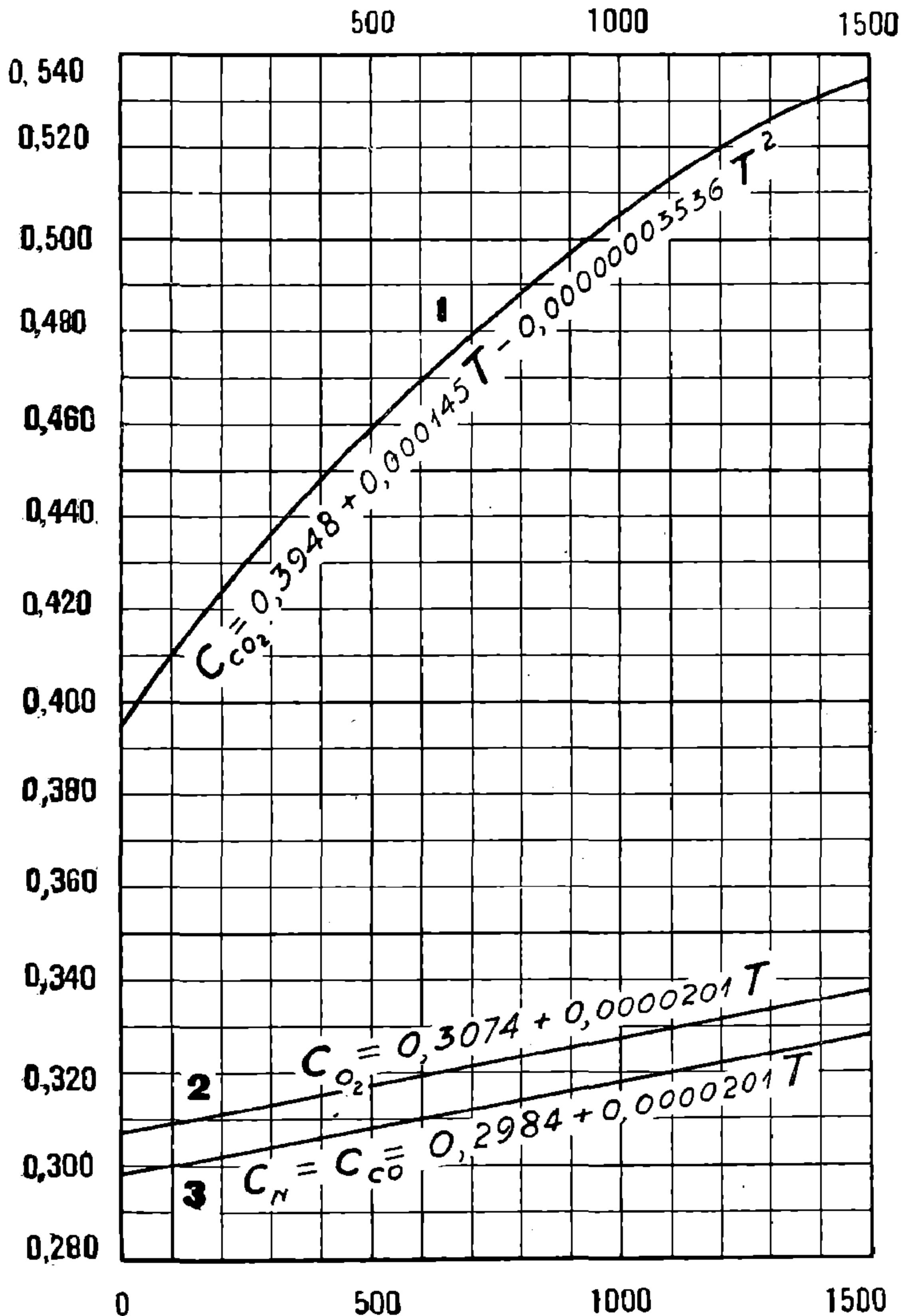
*Пример 14.* Определить потерю тепла с уходящими газами в час, если температура их 150° С, а избыток воздуха в них 80% против теоретически необходимого для полного сгорания. В топке ежечасно сжигалось 2 тонны

<sup>1)</sup> См. ф-лы (187) и (188).

<sup>2)</sup> См. 57 стр., формулу (133).

подмосковного угля с содержанием углерода 38,33%, водорода 3,13%, кислорода 7,06%, серы 3,58%, золы 15,75% и влаги 31,50% при вентиляторном вдувании под колосники воздуха, имеющего относительную влажность 50% и температуру 30° С. Барометрическое давление 740 мм рт. ст.

При подсчете считать сгорание полным и пренебречь потерями от механической неполноты сгорания.



Фиг. 6. Зависимость средней теплоемкости от температуры для двуокиси углерода (1), кислорода (2), азота и окиси углерода (3).

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)

*Решение.* По формулам (184) и (185):

$$C_{\text{сг.}} = 0,314 + 0,00003 \cdot 150 = 0,3185;$$

$$C_{\text{пл.}} = 0,45 + 0,00005 \cdot 150 = 0,4575.$$

По формуле (89): <sup>1)</sup>

$$\text{CO}_2 + \text{SO}_2 = \frac{17,86}{1,8 - 0,03} = 10,09;$$

по формуле (192): <sup>2)</sup>

$$Q_2 = \left[ \frac{38,33 + 0,375 \cdot 3,58}{0,536 \cdot 10,09} \cdot 0,3185 + \left( \frac{9 \cdot 3,13 + 31,5}{100} + \right. \right. \\ \left. \left. + 0,0137 \cdot 1,8 \cdot 5,359 \right) \cdot 0,4575 \right] \cdot 150 = 400,5 \quad . (192')$$

Следовательно всего теряется тепла с уходящими газами в час:

$$400,5 \cdot 2000 = 801\,000 \text{ калорий.}$$

При желании решить задачу более точно, пользуясь формулами для теплоемкости каждого газа в отдельности, необходимо предварительно определить состав дымовых газов, для чего в нашем случае полного сгорания нужно решить систему уравнений (78), а именно:

по формуле (72): <sup>3)</sup>

$$\text{O}_2 = 20,9 - 10,09 \cdot (1 + 0,1345) = 8,45;$$

по формуле (57):

$$\text{N}_2 = 100 - 10,09 - 8,45 = 81,46.$$

Для удобства пользования в дальнейшем преобразуем формулу (77) в следующий вид:

$$\text{CO}_2 = \frac{8 \cdot C}{8 \cdot C + 3 \cdot S} \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2); \quad . (77')$$

$$\text{SO}_2 = \frac{3 \cdot S}{8 \cdot C + 3 \cdot S} \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2). \quad . (77'')$$

Пользуясь формулой (77'), найдем:

$$\text{CO}_2 = \frac{8 \cdot 38,33 \cdot 10,09}{8 \cdot 38,33 + 3 \cdot 3,58} = 9,75;$$

$$\text{SO}_2 = 10,09 - 9,75 = 0,34.$$

Далее, по формулам (187), (188), (190) и (191) имеем:

$$C_{\text{CO}_2} = 0,3948 + 0,0001457 \cdot 150 - 0,00000003536 \cdot 150^2 = 0,4159;$$

$$C_{\text{SO}_2} = 0,3922 + 0,0001473 \cdot 150 - 0,00000004241 \cdot 150^2 + \\ + 0,00000000004464 \cdot 150^3 = 0,4134;$$

<sup>1)</sup> См. пример 11, стр. 48.

<sup>2)</sup>  $\psi$  взято из решения примера 6 (см. стр. 28);

$G_0$  » » » 5 (см. стр. 27).

<sup>3)</sup>  $\beta = 0,1345$  уже вычислено в примере 9 (см. стр. 41).

$$C_{O_2} = 0,3074 + 0,0000201 \cdot 150 = 0,3104;$$

$$C_{N_2} = 0,2984 + 0,0000201 \cdot 150 = 0,3014$$

и, наконец, по формуле (186) находим среднюю теплоемкость сухих газов:

$$C_{ср.} = 0,01 \cdot (9,75 \cdot 0,4159 + 0,34 \cdot 0,4134 + 8,45 \cdot 0,3104 + 81,46 \cdot 0,3014) = 0,3137$$

вместо 0,3185, вычисленной по формуле (184).

Следовательно  $Q_2$  по формуле (192) теперь определится равной:

$$Q_2 = \left[ \frac{38,33 + 0,375 \cdot 3,58}{0,536 \cdot 10,09} \cdot 0,3137 + \left( \frac{9 \cdot 3,13 + 31,5}{100} + \right. \right. \\ \left. \left. + 0,0137 \cdot 1,8 \cdot 5,359 \right) \cdot 0,4575 \right] \cdot 150 = 395,2.$$

А ежечасная потеря тепла с уходящими газами будет равна:

$$395,2 \cdot 2000 = 790\,400 \text{ калорий.}$$

Разница 801 000 — 790 400 равна 10 600 калорий в час, или 1,2‰.

## ГЛАВА ПЯТНАДЦАТАЯ.

### КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛА, ПОЛЕЗНО ИСПОЛЬЗОВАННОЕ УСТАНОВКОЙ.

В предыдущих главах нами приведены формулы и таблицы для определения потерь, имеющих место в котельных установках.

В настоящей главе мы займемся подсчетом тепла топлива, полезно использованного установкой, при чем рассмотрим этот вопрос в общем виде.

Пусть в котельной ежечасно сжигается  $B$  кг топлива, за счет которого получается:

1) Перегретый пар в количестве  $D_{пе}$  кг в час, с тепло-содержанием  $i_{пе}$  кал/кг.<sup>1)</sup>

2) Насыщенный пар в количестве  $D_x$  кг в час с теплосодержанием  $i_x$  кал/кг.

3) «Служебный» пар, идущий на покрытие собственных нужд котельной установки, в количестве  $D_c$  кг в час, с теплосодержанием  $i_c$  кал/кг.

4) Горячая вода из экономайзера в количестве  $W_{п.}$  кг при температуре  $t_3''$  °С, отбираемая после экономайзера для нагревательных целей (бани, производственные нужды, отопление и пр.).

5) Горячий воздух в количестве  $L$  кг при температуре его  $t$  °С.

<sup>1)</sup> Теплосодержание пара находится по таблицам или диаграмме  $I-S$ , приложенной в конце книги, на основании данных о давлении и температуре для перегретого пара или давлении и влажности для насыщенного пара.

При этом заметим, что вовсе не обязательно, чтобы воздух и вода, нагретые за счет отходящих из котла дымовых газов, расходовались в самой же котельной, — они могут быть отдаваемы и стороннему потребителю, как это нами и предвидится в пунктах 4 и 5.

Если обозначить через  $W_0$  кг общий расход питательной воды, <sup>1)</sup> то будем иметь:

$$W_0 = D_{\text{пе.}} + D_x + D_{\text{с.}} + W_{\text{п.}} . \quad (193)$$

Через  $L$  кг мы обозначим весь воздух, подогретый в воздушном экономайзере, но из этого количества  $L_{\text{п.}}$  кг может быть использовано и помимо котельной, например для производственных целей и для вентиляции. <sup>2)</sup>

Обозначив через:

$t'_{\text{э.}}$  — температуру воды, вступающей в экономайзер;

$t''_{\text{э.}}$  — температуру воды, выходящей из экономайзера;

$t'_{\text{к.}}$  — температуру воды, вступающей в котел;

$t_1$  — температуру воздуха, вступающего в воздушный экономайзер;

$t_2$  — температуру воздуха, выходящего из экономайзера, и относя полезно использованное тепло к одному килограмму израсходованного топлива, имеем:

количество тепла, воспринятое водой в экономайзере:

$$Q_1^{\text{э.}} = \frac{W_0}{B} \cdot (t''_{\text{э.}} - t'_{\text{э.}}) . \quad (194)$$

количество тепла, воспринятое водой в паровом котле:

$$Q_1^{\text{к.}} = \frac{D_{\text{пе.}} + D_x + D_{\text{с.}}}{B} \cdot (i_x - t'_{\text{к.}}) \quad (195)$$

количество тепла, воспринятое паром в пароперегревателе:

$$Q_1^{\text{пе.}} = \frac{D_{\text{пе.}} \cdot (i_{\text{пе.}} - i_x) + D_{\text{с.}} \cdot (i_{\text{с.}} - i_x)}{B} \quad (196)$$

<sup>1)</sup> В виду разных требований к качеству воды со стороны котельной и со стороны производственных нужд (крашение, баня, отопление и пр.) возможно иметь два независимых по питанию экономайзера для подогрева воды, с отдельными питательными насосами и подготовительными устройствами.

<sup>2)</sup> Конечно условия последующей работы воздуха должны быть учтены при конструировании воздушного экономайзера. В то время как примесь дымовых газов к воздуху на вентиляционные цели никоим образом допущена быть не может, примесь дымовых газов к воздуху, поступающему в топку, не является столь страшной.

УДУНТ  
(ДИТ)

количество тепла, воспринятое воздухом в воздушном экономайзере:

$$Q_1^B = \frac{1}{B} \cdot \left[ C_p \cdot \frac{L}{1 + \psi} + C_{вп.} \cdot \frac{\psi \cdot L}{1 + \psi} \right] \cdot (t'' - t_1) =$$

$$= \frac{L}{B} \cdot \frac{C_p + \psi \cdot C_{вп.}}{1 + \psi} \cdot (t'' - t_1), \quad (197)$$

где:

$C_p = 0,2323 + 0,0000155 \cdot (t'' + t_1)$  есть средняя удельная (отнесенная к 1 кг) теплоемкость сухого воздуха при постоянном давлении и изменении температуры его от  $t_1$  до  $t''$  °С в кал/кг °С; (198)

— количество водяных паров, внесенных с воздухом и приходящихся на 1 кг сухого воздуха. Определение величины  $\psi$  — см. главу V, стр. 26, формула (48);

$\frac{L}{1 + \psi}$  — вес сухого воздуха, вступившего в воздушный экономайзер;

$\frac{\psi \cdot L}{1 + \psi}$  — вес водяных паров, вошедших с воздухом в воздушный экономайзер;

$C_{вп.}$  — средняя теплоемкость водяных паров в пределах температур  $t_1'$  и  $t''$ , вычисляемая по формуле (185).<sup>1)</sup>

$$C_{вп.} = 0,45 + 0,00005 \cdot (t'' + t_1) \quad (185')$$

<sup>1)</sup> Формула средней теплоемкости от нуля до  $t^\circ$ , имеющая вид:

$$C = C_0 + a \cdot t. \quad (a)$$

есть следствие интегрирования при подсчете тепла по формуле для истинной теплоемкости, имеющей вид:

$$C_{ит.} = C_0 + A \cdot t, \quad (б)$$

где

$$a = \frac{A}{2}, \text{ или } A = 2 \cdot a \quad (в)$$

В самом деле, количество тепла, сообщенное телу при нагреве его от нуля до  $t^\circ$ , найдется на основании формулы (б) путем интегрирования:

$$Q_{0-t} = \int_0^t (C_0 + A \cdot t) \cdot dt = C_0 \cdot t + A \cdot \frac{t^2}{2} = \left( C_0 + \frac{A}{2} \cdot t \right) \cdot t = (C_0 + a \cdot t) \cdot t.$$

Если мы желаем знать среднюю теплоемкость в пределах температур от  $t_1$  до  $t''$ , то получим, очевидно, следующее:

$$Q_{t_1-t''} = \int_{t_1}^{t''} (C_0 + A \cdot t) \cdot dt = C_0 \cdot (t'' - t_1) + A \cdot \frac{t''^2 - t_1^2}{2} =$$

$$= [C_0 + a \cdot (t'' + t_1)] \cdot (t'' - t_1), \dots \quad (г)$$

где  $C_0 + a \cdot (t'' + t_1)$  — средней теплоемкости в пределах температур  $t_1$  и  $t''$ , получаемой и из формулы (а) подстановкой в нее вместо  $t$  суммы  $(t_1 + t'')$ , а не полусуммы.

УДМУНТ  
(ДИТ)

На практике может иметь случай использование дымовых газов рассчитываемой или исследуемой котельной установки для дополнительного, или так называемого вторичного (промежуточного), пароперегревателя, нередко даже предназначенного для перегрева пара, отработанного в производствах; в этом случае полезное тепло, воспринятое паром во втором перегревателе, должно быть прибавлено в числитель формулы (196).

Точно также, когда имеет место использование тепла уходящих дымовых газов на цели сушки, нужно учесть его отдельно, как полезное тепло, и ввести в правую часть основного уравнения теплового баланса котельных установок, выраженного формулой (1).<sup>1)</sup>

В заключение этой главы отметим, что формула (197) может быть дана в следующем виде:

$$Q_1^p = C \cdot (t'' - t') \cdot \frac{L}{B}, \quad (199)$$

где  $C$  есть средняя теплоемкость влажного воздуха в  $\text{кал/кг}^\circ\text{C}$ , определяемая по формуле:

$$C = \frac{C_p + \psi C_{\text{вл.}}}{1 + \psi} \quad (200)$$

Кроме того отметим, что разница в температурах воды при входе в котел ( $t'_k$ ) и по выходе из экономайзера ( $t''_э$ ) объясняется потерями в окружающую среду и может быть выражена соотношением:

$$t'_k \cong t''_э. \quad (201)$$

При изолированной или при очень короткой питательной трубе разница  $t'_k - t''_э$  может быть принята равной нулю.

В некоторых случаях на практике обнаруживается неравенство обратного знака, т.-е.:

$$t'_k > t''_э. \quad (202)$$

Этот случай, при условии правильного измерения температур, указывает на пропуск горячей воды из котла через неплотности плохо притертого или неисправного обратного клапана, что особенно легко обнаруживается при периодическом питании котла.

*Пример 15.* Испытанием установлено, что котельная ежедневно расходует 1739 кг антрацита, вырабатывая перегретого пара 13 898 кг при температуре перегрева  $342^\circ\text{C}$  и давлении в котле 14,2 атм. абс., который она

<sup>1)</sup> См. главу II, стр. 9.

отпускает потребителю, и насыщенный пар при его влажности 0,5% в количестве 650 кг, расходуемый непосредственно из котла на служебные нужды в самой котельной. Кроме того в воздушном экономайзере подогревается до температуры 110°C ежечасно 16 500 кг воздуха, имеющего при входе в экономайзер относительную влажность 50% при температуре 30°C. Барометрическое давление 740 мм рт. ст.

Температура питательной воды при входе в экономайзер 35°C, а при выходе из него 96°C; при этой же температуре вся вода поступает в котел.

Определить количество тепла, полезно воспринятое в котельной установке.

*Решение.* Прежде всего, пользуясь таблицами для водяного пара или  $I-S$  диаграммой, находим теплосодержание пара при давлении 14,2 атм. абс и температуре 342°C, что дает нам:

$$i_{\text{пе.}} = 748,5 \text{ кал/кг.}$$

Теплосодержание насыщенного пара при его влажности 0,5%, т.-е. при паросодержании  $x = 0,995$ , имеем:

$$i_x = 0,995 \cdot 668,5 = 665,2 \text{ кал/кг.}$$

Температура воды при входе в котел в нашем случае:

$$t'_{\text{к.}} = t''_{\text{в.}} = 96^\circ\text{C.}$$

Количество воды, прошедшее через водяной экономайзер, в нашем случае равно:

$$W = 13\,898 + 650 = 14\,548 \text{ кг/час.}$$

Следовательно имеем по формуле (194):

$$Q_1^{\text{в.}} = \frac{14\,548}{1739} \cdot (96 - 35) = 510,3 \text{ кал.}$$

По формуле (195):

$$Q_1^{\text{к.}} = \frac{(13\,898 + 650) \cdot (665,2 - 96)}{1739} = 4761,7 \text{ кал.}$$

По формуле (196):

$$Q_1^{\text{пе.}} = \frac{13\,898 \cdot (748,5 - 665,2)}{1739} = 665,7.$$

Итак, всего воспринято тепла водой и паром:

$$Q_1 = Q_1^{\text{в.}} + Q_1^{\text{к.}} + Q_1^{\text{пе.}} = 5937,7 \text{ кал.}$$

Далее, по формулам (198) и (185), имеем:

$$C_{\text{р.}} = 0,2323 + 0,0000155 \cdot (110 + 30) = 0,2345;$$

$$C_{\text{вп.}} = 0,45 + 0,00005 \cdot (110 + 30) = 0,457.$$

По формуле (197) найдем количество тепла, воспринятое воздухом: <sup>1)</sup>

$$Q_1^{\text{в.}} = \frac{16\,500}{1739} \frac{(0,2345 + 0,0137 \cdot 0,457)}{1 + 0,0137} \cdot (110 - 30) = 202,8.$$

<sup>1)</sup> Величина  $\psi$ , входящая в формулу (197), взята равной 0,0137 на основании решения примера 6 (см. стр. 28).

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)



Следовательно всего полезно воспринято в котельной тепла водой, паром и воздухом в сумме:  $Q_1 + Q_1^B = 6140,5$  калорий на каждый килограмм сожженного антрацита, из которого приходится на долю пароперегревателя 10,84%, котла 77,55%, водяного экономайзера 8,31% и воздушного экономайзера 3,30%.

## ГЛАВА ШЕСТНАДЦАТАЯ.

### КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛА, ВВЕДЕННОЕ В ТОПКУ.

Общее количество тепла, введенное в топку и отнесенное к одному килограмму топлива, обозначенное нами в главе II через  $Q_T$  калорий, может быть подсчитано по следующей формуле:

$$Q_T = Q_{\text{раб.}} + C_T \cdot t_T + C_p \cdot \alpha_T \cdot G_0 \cdot t_v + i \cdot \psi \cdot \alpha_T \cdot G_0 + i_{\phi} \cdot W_{\phi}, \quad (203)$$

где:

- $C_T$  — средняя удельная теплоемкость топлива в  $\text{кал/кг}^\circ\text{C}$ ;
- $t_T$  — температура топлива, поступающего в топку в градусах C;
- $i_{\phi}$  — теплосодержание пара, вдуваемого в топку;
- $W_{\phi}$  — расход пара на дутье в килограммах на 1 кг топлива;
- $i$  — теплосодержание водяных паров, вносимых в топку с влажным воздухом, которое находится по формуле:  
 $i = \lambda + 0,48 \cdot (t_v - t_s)$ ;
- $\lambda$  — полная теплота ( $\text{кал/кг}$ ) сухого насыщенного пара, определяемая по таблице V (см. стр. 205) на основании подсчитанного предварительно по формуле (41) парциального давления водяных паров во влажном воздухе;
- $t_s$  — температура насыщенного пара, соответствующая парциальному давлению, берется по той же таблице V;
- $t_v$  — температура вводимого в топку воздуха в  $^\circ\text{C}$ .

С остальными обозначениями мы уже знакомы.

Формула (203) разбивает общее количество тепла, поступившее в топку, на следующие пять слагаемых:

первое =  $Q_{\text{раб.}}$  = рабочей теплопроизводительности топлива;

второе =  $C_T \cdot t_T$  = теплу, внесенному с топливом, имеющим температуру  $t_T$   $^\circ\text{C}$ , за счет его теплоемкости;

третье =  $C_p \cdot \alpha_T \cdot G_0 \cdot t_v$  = теплу, внесенному воздухом, а именно его сухой частью (без учета тепла водяных паров, которое учитывается отдельно следующим слагаемым);

УДМУНТ  
(ДИТ)

четвертое  $= i \cdot \psi \cdot \alpha_{\text{т}} \cdot G_0 =$  теплу, внесенному водяными парами, поступающими вместе с воздухом при температуре  $t_{\text{в}}^{\circ}\text{C}$ ;

пятое  $= i_{\text{ф}} \cdot W_{\text{ф}} =$  теплу, внесенному водяными парами с паровым дутьем.

Доминирующим из них является первое слагаемое — рабочая теплопроизводительность топлива, по сравнению с которым второе является ничтожно малым, если топливо поступает в топку неподогретым (как это имеет место в большинстве установок), и во всяком случае лежит вне пределов точности наших данных о теплопроизводительности топлива. Но коль скоро топливо вводится в топку сильно подогретым (особенно газообразное топливо), второе слагаемое приобретает столь заметную величину, что игнорировать его не рекомендуется.

*Пример 16.* Определить количество тепла, внесенного в топку при сжигании антрацита марки АП, имеющего следующий состав: углерода 85,86%, водорода 1,75%, кислорода и азота 1,16%, серы 1,57%, золы 4,89%, влаги 4,77%. Теплопроизводительность (низшая) по бомбе 7263 кал/кг.

Условия сжигания: антрацит сжигался на колосниковой решетке с паровым дутьем, при расходе перегретого пара ( $P = 4$  атм. абс.,  $t = 200^{\circ}\text{C}$ ) на дутье в количестве 0,4 кг на 1 кг антрацита; коэффициент избытка воздуха в топке 1,3; воздух брался из котельной при температуре его  $30^{\circ}\text{C}$  с относительной влажностью 50%; забрасываемый в топку антрацит имел температуру также  $30^{\circ}\text{C}$ .

*Решение.* 1) Рабочая теплопроизводительность топлива

$$Q_{\text{раб.}} = 7263 \text{ кал.}$$

2) Оценивая теплоемкость антрацита  $= 0,33$ , имеем:

$$C_{\text{т}} \cdot t_{\text{т}} = 0,33 \cdot 30 = 9,9 \text{ кал.}$$

3) Теоретически необходимое количество сухого воздуха  $G_0$  определяем по формуле (54):<sup>1)</sup>

$$G_0 = 0,1155 \cdot \left[ 85,86 + 3 \cdot \left( 1,75 - \frac{1,16}{8} \right) \right] = 10,57 \text{ кг.}$$

Среднюю теплоемкость находим по формуле (198):

$$C_{\text{р.}} = 0,2323 + 0,0000155 \cdot 30 = 0,2332 \text{ кал/кг}^{\circ}\text{C},$$

следовательно

$$C_{\text{р.}} \cdot \alpha \cdot G_0 \cdot t_{\text{в}} = 0,2332 \cdot 1,3 \cdot 10,57 \cdot 30 = 96,1 \text{ кал.}$$

4) В примере 6 (см. 28 стр.) мы имели:

$$\psi = 0,0137 \text{ и } P_{\text{впс.}} = 15,9 \text{ мм рт. ст.}$$

<sup>1)</sup> Содержание азота в антраците принято равным нулю, согласно сноске на стр. 14.

По таблице V (см. 205 стр.):

$$t_s = 18,5^\circ \text{C} \quad \text{и} \quad \lambda = 603,6.$$

По формуле (205):

$$i = 603,6 + 0,48 (30 - 18,5) = 609,1;$$

следовательно

$$i \quad G_0 = 609,1 \cdot 0,0137 \quad 1,3 \cdot 10,57 = 114,7.$$

5) Теплосодержание пара, пошедшего на дутье, находим по  $I-S$  диаграмме равным:

$$i_{\phi.} = 682,5 \text{ кал/кг};$$

следовательно

$$i_{\phi.} \quad W_{\phi.} = 682,5 \cdot 0,4 = 273 \text{ кал.}$$

Окончательно имеем по формуле (203):

$$Q_{\text{т.}} = 7263 + 9,9 + 96,1 + 114,7 + 273 = 7756,7 \approx 7757 \text{ кал};$$

$$100\% = 93,63 + 0,13 + 1,24 + 1,48 + 3,52 = 100\%;$$

$$106,8\% = 100\% + 0,14 + 1,32 + 1,58 + 3,76 = 106,8\%.$$

Если принять полное насыщение воздуха водяными парами <sup>1)</sup> при его температуре  $30^\circ \text{C}$ , то количество тепла с водяными парами воздуха возрастет, а именно:

$$\psi = 0,002153 \cdot \frac{30,4 \cdot (273 + 30)}{740 - 31,8} = 0,028; ^2)$$

$$i = 609,2 + 0,48 \cdot (30 - 30) = 609,2; ^3)$$

и следовательно

$$i \cdot \psi \cdot \alpha \quad G_0 = 609,2 \cdot 0,028 \cdot 1,3 \quad 10,57 = 234,4 \text{ кал},$$

что составляет  $3,02\%$  от рабочей теплопроизводительности.

В левую часть основного уравнения теплового баланса котельной установки (см. главу II) помимо слагаемого  $Q_{\text{т.}}$ , учитывающего тепло, введенное в топку, входит второе слагаемое  $Q_{\text{пр.}}$ , учитывающее тепло, внесенное с воздухом, засосанным в газоходы (см. главу XIII). Последняя величина может быть подсчитана по следующей формуле:

$$Q_{\text{пр.}} = G_0 \cdot (C_{\text{р.}} \cdot t_{\text{в.}} + i \cdot \psi) \cdot (\alpha_{\text{у.}} - \alpha_{\text{т.}}), \quad (204)$$

где  $\alpha_{\text{у.}}$  — коэффициент избытка воздуха в уходящих газах,

»  $\alpha_{\text{т.}}$  — коэффициент избытка воздуха в топке.

Остальные обозначения нами только-что разобраны.

<sup>1)</sup> Случай полного насыщения воздуха водяными парами имеет место при увлажнении воздуха до поступления его в зольник с целью лучшего охлаждения колосников. Для той же цели иногда в самом зольнике ставятся особые распылители воды для обрызгивания колосников, при чем воздух, проходя через водяную пыль, также насыщается водяными парами.

<sup>2)</sup> См. формулу (48).

<sup>3)</sup> См. 205 стр., таблица V.

ГЛАВА СЕМНАДЦАТАЯ.

## КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.

Под коэффициентом полезного действия в технике принято понимать отношение полезно полученной работы к работе затраченной.

В нашем случае использования тепла в котельной установке, для характеристики работы ее, подобное определение коэффициента полезного действия приводит к отношению:

$$\begin{aligned} \eta'_{ку.} &= \frac{\text{полезно использованное тепло}}{\text{тепло, введенное в топку}} = \\ &= \frac{Q_1^{\text{э.}} + Q_1^{\text{к.}} + Q_1^{\text{пе.}} + Q_1^{\text{в.}}}{Q_{\text{т.}}} = \frac{Q_1 + Q_1^{\text{в.}}}{Q_{\text{т.}}} \end{aligned} \quad (205)$$

Этим отношением и нужно пользоваться для точной характеристики использования всего тепла, поступающего в топку. Особенное значение имеет формула (205) при сравнении отдельных котельных, работающих на холодном и горячем газовом топливе, при получении последнего со стороны в нагретом состоянии.

Обычно же на практике интересуются использованием тепла, заключенного в топливе в виде его рабочей теплопроизводительности, и потому понимают под коэффициентом полезного действия котельной установки отношение:

$$\begin{aligned} \eta_{ку.} &= \frac{\text{полезно использованное тепло}}{\text{рабочая теплопроизводительность топлива}} = \\ &= \frac{Q_1^{\text{э.}} + Q_1^{\text{к.}} + Q_1^{\text{пе.}} + Q_1^{\text{в.}}}{Q_{\text{раб.}}} = \frac{Q_1 + Q_1^{\text{в.}}}{Q_{\text{раб.}}} \end{aligned} \quad (206)$$

Ясно, что:

$$\eta'_{ку.} < \eta_{ку.} \quad (207)$$

На основании уравнения (1) имеем:

$$Q_1 + Q_1^{\text{в.}} = Q_{\text{т.}} - (Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 - Q_{\text{пр.}}) \quad (208)$$

Подставляя  $Q_{\text{т.}}$  из формулы (203), а  $Q_{\text{пр.}}$  из формулы (204) и обозначая:

$$Q'_2 = Q_2 - (C_{\text{т.}} \cdot t_{\text{т.}} + C_{\text{р.}} \cdot \alpha_{\text{т.}} \cdot G_0 \cdot t_{\text{в.}} + i \cdot \psi \cdot \alpha_{\text{т.}} \cdot G_0 + i_{\phi} \cdot W_{\phi} - Q_{\text{пр.}}) \quad (209)$$

получим:

$$Q_1 + Q_1^{\text{в.}} = Q_{\text{раб.}} - (Q'_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5) \quad (210)$$

КНИЖНИЦА  
ДУНТ  
(ДНТ)

Пренебрегая теплом, внесенным с теплоемкостью топлива, т.-е. считая  $C_T \cdot t_T = \text{нулю}$ , можно величину  $Q_2'$  выразить следующей приближенной формулой, которой и можно пользоваться на практике при подсчете тепла с «уходящими» газами, когда топливо вводится в топку не подогретым:

$$Q_2' = \left[ \frac{C + 0,375 \cdot S}{0,536 \cdot (CO_2 + SO_2 + CO)_y} \cdot C_{сг.} + \left( \frac{9 \cdot H + W}{100} + \psi \cdot \alpha_y \cdot G_0 \right) \cdot C_{вп.} \right] \times \\ \times (T_y - t_{в.}) + 0,48 \cdot W_{ф.} \cdot (T_y - t_{ф.}), \quad (211)$$

где  $t_{ф.}$  — температура вдуваемого пара. Остальные обозначения прежние. Теплоемкость сухих газов ( $C_{сг.}$ ) и теплоемкость водяных паров ( $C_{вп.}$ ) подсчитываются по формулам (184) и (185), подставляя в них вместо  $T$  сумму  $(T_y + t_{в.})$ .<sup>1)</sup>

Формулы (208) и (210) дают количество тепла, полезно перешедшее от газов к воде, пару и воздуху; следовательно коэффициент полезного действия котельной установки, определяемый по формуле (206), учитывает лишь степень использования рабочей теплопроизводительности горючего и потому должен быть назван коэффициентом полезного действия котельной установки брутто, ибо он не учитывает самопотребления котельной<sup>2)</sup>

$$\eta_{кв.}^{\text{брутто}} = \frac{Q_1 + Q_1^{\text{в.}}}{Q_{\text{раб.}}} \quad (212)$$

То же надо сказать и по отношению формулы (205) при точном учете степени использования всего тепла, вводимого в топку с 1 кг топлива.

Когда теплый воздух, поступающий в топку, получен в воздушном экономайзере, использовавшем уходящие газы из рассчитываемого котла, то часть тепла, учитываемую вторым и третьим слагаемыми в скобках в формуле (209), нужно вычесть из всего тепла, пошедшего на подогрев воздуха в «воздушном» экономайзере.

Сделать это можно проще всего, считая тепло, пошедшее только на нагрев воздуха, отпускаемого «воздушным» экономайзером на сторону. Обозначив это тепло через  $(Q_1^{\text{в.}})_{п.}$  получим:

$$Q_1 + (Q_1^{\text{в.}})_{п.} = Q_{\text{раб.}} - (Q_2'' + Q_3 + Q_4 + Q_5), \quad (210')$$

где

$$Q_2'' = \left[ \frac{C + 0,375 \cdot S}{0,536 \cdot (CO_2 + SO_2 + CO)_y} \cdot C_{сг.} + \left( \frac{9 \cdot H + W}{100} + \psi \cdot \alpha_y \cdot G_0 \right) \cdot C_{вп.} \right] \times \\ \times (T_y - t_{в.}) + 0,48 \cdot W_{ф.} \cdot (T_y - t_{ф.}) - Q_{\text{пр.}} \quad (211')$$

<sup>1)</sup> См. сноску на стр. 85.

<sup>2)</sup> См. главу XXXII.

При подсчете  $Q''$  в формулу (211') вставляется температура воздуха  $t$ , °С при входе в экономайзер для подогрева воздуха, а  $Q_{пр.}$  подсчитывается по формуле (204).

Следовательно для коэффициента полезного действия котельной установки в этом случае получим выражение:

$$\eta_{ку.}^{брутто} = \frac{Q_1 + (Q_1^{в.})_{п.}}{Q_{раб.}} \quad (212')$$

Итак, при оборудовании котельной собственным «воздушным» экономайзером подсчет коэффициента полезного действия котельной установки по рабочей теплотеплопроизводительности топлива нужно вести по формуле (212'), считая использованное тепло по формуле (210'),<sup>1)</sup> а потерю с отходящими газами по формуле (211').

*Пример 17.* Определить коэффициент полезного действия котельной установки брутто для примера 15, если условия сжигания антрацита были таковы, как указано в примере 16.

*Решение.* По формуле (212) имеем:

$$\eta_{ку.} = \frac{6140,5}{7263} = 0,845, \text{ или } 84,5\% \text{ (брутто).}$$

По формуле (205) имеем:

$$\eta'_{ку.} = \frac{6140,5}{7757} = 0,791, \text{ или } 79,1\% \text{ (брутто).}$$

Если бы воздух, нагретый в экономайзере, вводился в топку, то, пренебрегая потерями тепла на пути от «воздушного» экономайзера в топку, мы получили бы:

$$Q_{т.} = 7757 \text{ } ^2) + 202,8 \text{ } ^3) = 7960 \text{ кал.}$$

По формуле (205):

$$\eta'_{ку.} = \frac{6140,5}{7960} = 0,77, \text{ или } 77\% \text{ (брутто).}$$

По формуле (212'):

$$\eta_{ку.} = \frac{5937,7 \text{ } ^4)}{7263} = 0,8175, \text{ или } 81,75\% \text{ (брутто).}$$

Анализ формул (208), (183) и (110) приводит нас к заключению, что не всегда стремление избежать потери от химической неполноты сгорания приводит нас к выгоде, так как нередко отсутствие окиси углерода в дымовых газах покупается за счет

<sup>1)</sup> Расчет необходимой поверхности нагрева экономайзера для подогрева воздуха должен делаться на полное количество тепла  $Q_1^{в.}$ , необходимое для нагревания  $L$  кг воздуха в час, проходящего через экономайзер.

<sup>2)</sup> См. стр. 90.

<sup>3)</sup> См. стр. 87.

<sup>4)</sup> См. стр. 87.

увеличения избытка воздуха и, следовательно, за счет увеличения потери с уходящими газами.

То же должно быть отмечено и по отношению к механическому недожогу. Иногда удается снизить потерю от механической неполноты сгорания за счет некоторого увеличения избытка воздуха, что часто имеет место, например, при цепных решетках, но в этом случае также уменьшение потери от механической неполноты сгорания будет сопровождаться увеличением потери с уходящими газами.

На практике нужно стремиться при регулировании процесса сгорания в топке иметь минимум суммы потерь  $(Q_2 + Q_3 + Q_4)$  и, само собой разумеется, необходимо заботиться о снижении потерь  $Q_3$  в окружающую среду, что достигается лишь при внимательном надзоре за состоянием обмуровки и за работой обслуживающего персонала.

Необходимо, однако, здесь же еще раз <sup>1)</sup> подчеркнуть, что ошибки, совершенные при проектировании установки или допущенные при монтаже ее, являются наиболее неприятными причинами плохой работы установки в эксплуатации и не всегда могут быть исправлены без существенных денежных затрат, являясь в то же время источником постоянных перерасходов.

В частности, недостаточно внимательный выбор температуры уходящих газов  $T_y$ , от величины которой зависит, как это видно из формул (1), (183), (192), (205) и (206), коэффициент полезного действия котельной установки, а следовательно, и расход топлива, особенно часто бывает причиной лишних затрат либо на топливо либо на покрытие расходов по капитализации, амортизации и ремонту не в достаточной степени используемого оборудования.

*Пример 18.* Полагая потерю от механической неполноты сгорания одинаковой, выяснить, какой смене в примере 12 удалось работать с меньшими потерями тепла в уходящих газах и от химической неполноты сгорания, если температура уходящих газов в обоих случаях была  $200^\circ\text{C}$ .

*Решение.* Примем для упрощения в обоих случаях  $Q_4 = 0$  и  $Q_{пр.} = 0$ ; тогда имеем:

1) для первой смены:

$$Q'_2 = \left[ \frac{38,33 + 0,375 \cdot 3,58}{0,536 \cdot 13,04} \cdot 0,32 + \left( \frac{9 \cdot 3,13 + 31,5}{100} + 0,0137 \cdot 1,4 \cdot 5,359 \right) \cdot 0,46 \right] \cdot (200 - 30) = 363,5;$$

$$Q_2 + Q_3 = 363,5 + 0 = 363,5 \text{ кал},$$

<sup>1)</sup> См. главу I. Введение.

или в ‰:

$$q'_2 + q_3 = \frac{363,5}{3595} \cdot 100 = 10,11\%$$

2) для второй смены:

$$Q'_2 = \left[ \frac{38,33 + 0,375 \cdot 3,58}{0,536 \cdot (13,55 + 0,48)} \cdot 0,32 + \left( \frac{9 \cdot 3,13 + 31,5}{100} + 0,0137 \cdot 1,33 \cdot 5,359 \right) \cdot 0,46 \right] (200 - 30) = 34,3;$$

$$Q_2 + Q_3 = 341,3 + 76,95 = 418,25 \text{ кал,}$$

или в ‰:

$$q'_2 + q_3 = \frac{418,25}{3595} \cdot 100 = 11,63\%$$

Вторая смена работала хуже.

*Примечание.* Если подсчитать потерю с уходящими газами по формуле (192) и выразить сумму потерь с уходящими газами при  $T = 200^\circ\text{C}$  и от химической неполноты сгорания в ‰ от всего тепла, введенного в топку, то получим:

1) для первой смены:

$$q_2 + q_3 = \frac{427,6}{3710} \cdot 100 = 11,53\%;$$

2) для второй смены:

$$q_2 + q_3 = \frac{478,4 \cdot 100}{3704} = 12,89\%.$$

## ГЛАВА ВОСЕМНАДЦАТАЯ.

### ВЫБОР ТЕМПЕРАТУРЫ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ.

Совершенно очевидно, что со стремлением получить возможно низкую температуру уходящих газов связана необходимость увеличения поверхности нагрева, утилизирующей теплоту газов.

Следовательно, с одной стороны, при увеличении коэффициента полезного действия котельной за счет понижения температуры уходящих газов уменьшается расход на топливо, а, с другой стороны, увеличиваются расходы по капитализации, амортизации, ремонту и обслуживанию, ибо увеличивается поверхность нагрева котельной, а в случае естественной тяги и размеры дымовой трубы.

Поэтому при выборе температуры уходящих газов приходится считаться с весьма многими факторами, учесть которые легче всего путем параллельных расчетов, задаваясь разными температурами уходящих газов и рассчитывая для каждой из них все элементы котельной, включая и тяговые устройства, а также и стоимость обслуживания.

УДУНТ  
(ДИТ)



Для первой ориентировки возможно выбрать температуру уходящих газов следующим рассуждением: если мы обозначим температуру уходящих газов через  $T_y$  (в градусах Цельсия), а температуру входящего в экономайзер подогреваемого тела (в нашем случае вода или воздух) через  $t'$  °С, то, увеличивая поверхность нагрева на 1 кв. м, мы получим дополнительно полезного тепла:  $K \cdot (T_y - t')$  калорий в час, где  $K$ <sup>1)</sup> есть количество калорий тепла, прошедшее в час от дымовых газов к нагреваемому телу через 1 кв. м поверхности нагрева при разности температур 1°С.

Если пренебречь потерями в окружающую среду и обозначить через  $b_T$  (в копейках) стоимость одной тоннакалории тепла в топливе,<sup>2)</sup> а через  $n$  — число часов работы установки, то будем иметь, при увеличении поверхности нагрева экономайзера на 1 кв. м, годовую экономию в затратах на топливо равной (в рублях):

$$\frac{K \cdot (T_y - t')}{1000} \cdot \frac{b_T}{100} \cdot n = 10^{-3} K \cdot b_T \cdot n \cdot (T_y - t') \quad (214)$$

Экономия эта покупается за счет дополнительных затрат на оборудование.

При увеличении поверхности нагрева на 1 кв. м, для получения денежной экономии в затратах на топливо, указанной в формуле (214), необходимо ежегодно дополнительно расходовать на капитализацию, амортизацию и ремонт:

$$\frac{(z + t + r) \cdot a_э}{100} \text{ рублей,} \quad (215)$$

где:

- $a_э$  — стоимость 1 кв. м дополнительной поверхности нагрева с обмуровкой в рублях;  
 $z$  — процент, отчисляемый на капитал;  
 $t$  — » » в погашение (амортизация);  
 $r$  — » » на ремонт.

<sup>1)</sup> Эта величина  $K$  называется коэффициентом теплопередачи (см. главу XXI и след.).

<sup>2)</sup> 1 тоннакалория = 1 ткал = 1000 калорий. Стоимость (в копейках) одной тоннакалории тепла в топливе вычисляется по следующей формуле:

$$b_T = 100 \cdot \frac{B_T}{Q_{\text{раб}}}, \dots \quad (213)$$

где  $B_T$  — стоимость одной тонны топлива в рублях (франко топка, т.-е. учитывая все расходы по доставке топлива).

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)

Ясно, что увеличивать поверхность нагрева имеет смысл только при условии превышения экономии в топливе (214) над дополнительными затратами (215), т.-е. при наличии соотношения:

$$10^{-3} \cdot K \cdot b_{\text{т.}} \cdot n \cdot (T_{\text{г.}} - t') \text{ не меньше } 10^{-2} \cdot (z + t + r) \cdot a_{\text{э.}} \quad (216)$$

При равенстве экономии (214) и дополнительных затрат (215) имеем:

$$T_{\text{г.}} = \frac{10^3 \cdot (z + t + r) \cdot a_{\text{э.}}}{K \cdot b_{\text{т.}} \cdot n} + t' \quad (217)$$

Формула (217) дает невыгоднейшую температуру приблизительно, так как при выводе ее пренебрегалось изменениями в стоимости тяговой установки и в обслуживании, учет которых может несколько видоизменить результат.<sup>1)</sup>

Чем больше часов в году работает установка, чем дороже топливо, чем дешевле оборудование и капитал, — тем более низкой должна быть выбрана температура уходящих газов.

Помимо соображений экономически-денежного характера, необходимо иметь в виду целый ряд теплотехнических и технологических соображений, влияющих на выбор температуры уходящих газов.

Условия хорошей теплопередачи требуют наличия разницы между температурой газов, отдающих тепло, и телом, получающим тепло. Практика показывает, что при разнице температур, меньшей 50°C, теплопередача идет весьма слабо; поэтому при проектировании желательно удовлетворить неравенство

$$T_{\text{г.}} > t' + 50, \quad (218)$$

где  $T_{\text{г.}}$  — температура уходящих из экономайзера газов, а  $t'$  — температура воды или воздуха, входящих в экономайзер.

Условия долговечности и надежности также предостерегают от чрезмерного увлечения низкими температурами, ибо последнее может повлечь сильное изнашивание экономайзера и тяговых устройств, если начнется конденсация водяных паров, находящихся в дымовых газах, особенно при наличии в них сернистых газов.

Температура ( $t_{\text{р.}}$ ), при которой начинается конденсация водяных паров, зависит от их парциального давления в газовой среде и носит название температуры точки росы.

<sup>1)</sup> Например, в случае естественной тяги, принятие во внимание стоимости дымовой трубы приводит к увеличению невыгоднейшего значения температуры уходящих газов.

Чтобы избежать потения «водяного» экономайзера <sup>1)</sup> и связанного с ним его ржавления, рекомендуется питать экономайзер подогретой водой, температура которой  $t'_э$  должна превышать температуру ( $t_p$ ), соответствующую точке росы, т.-е. должно быть соблюдено неравенство:

$$t'_э > t_p. \quad (219)$$

*Пример 19.* Выяснить наивыгоднейшую температуру уходящих газов из котельной при условии, что котельная работает 300 дней в году по 16 часов в сутки и сжигает уголь стоимостью франко-котельная 9 рублей за тонну. Рабочая теплопроизводительность угля 3595 кал/кг.

Стоимость экономайзера для подогрева воды 65 рублей за 1 кв. м (с обмуровкой).

Стоимость экономайзера для подогрева воздуха 15 рублей за 1 кв. м с обмуровкой.

Температура воды при входе в экономайзер 50°C.

Температура воздуха 30°C.

Коэффициент теплопередачи для водяного экономайзера принять равным 12 кал/кв. м · °С · час, а для воздушного экономайзера равным 8 кал/кв. м · °С · час. <sup>2)</sup>

*Решение.* По формуле (213) имеем:

$$b_t = \frac{100 \cdot 9}{3595} = 0,25 \text{ коп/т кал.}$$

Считая процент на капитал = 10%, на амортизацию 10% (что отвечает сроку службы 10 лет) и на ремонт 2%, т.-е. принимая сумму  $z + i + r = 22$ , получим по формуле (217):

1) для водяного экономайзера, при работе 300 дней по 16 часов, всего 4800 часов в год, наивыгоднейшую температуру;

$$T_y = \frac{10^3 \cdot 22 \cdot 65}{12 \cdot 0,25 \cdot 4800} + 50 = 149^\circ\text{C};$$

2) для воздушного экономайзера при тех же условиях имеем:

$$T_y = \frac{10^3 \cdot 22 \cdot 15}{8 \cdot 0,25 \cdot 4800} + 30 = \text{около } 65^\circ\text{C}.$$

Если котельная перейдет на работу по 8 часов в сутки, то наивыгоднейшая температура уходящих газов получит уже другую величину, а именно:

<sup>1)</sup> Результат осаждения на нем влаги из дымовых газов. Здесь мы говорим о «водяном» экономайзере лишь как о более дорогой поверхности нагрева, избежать преждевременного износа которой крайне желательно. «Воздушный» экономайзер также подвержен ржавлению, иногда даже большему, чем «водяной».

<sup>2)</sup> Выбор величины коэффициента теплопередачи тепла делается на основании знания законов о теплопередаче и условий работы экономайзеров (см. главу XXI и след.).

1) для водяного экономайзера:

$$T_y = \frac{10^3 \cdot 22 \cdot 65}{12 \cdot 0,25 \cdot 300 \cdot 8} + 50 = 248^\circ\text{C};$$

2) для воздушного экономайзера:

$$T_y = \frac{10^3 \cdot 22 \cdot 15}{8 \cdot 0,25 \cdot 300 \cdot 8} + 30 = 99^\circ\text{C}.$$

*Примечание.* Рекомендуется читателю самому выяснить на этом частном примере, как отзывается на выборе  $T_y$  повышение и уменьшение стоимости топлива, изменение в цене экономайзера и в стоимости капитала (процент на капитал) и т. д.

## ГЛАВА ДЕВЯТНАДЦАТАЯ.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТОЧКИ РОСЫ.

Решение задачи об определении температуры, соответствующей точке росы, сводится к определению парциального давления водяных паров.

Пусть в данном сечении объем сухих газов, приведенный к «нормальному состоянию» ( $0^\circ\text{C}$  и  $760$  мм рт. ст.), равен  $V_{\text{сг.}}$  куб. м на 1 кг сожженного топлива, а объем водяных паров, приведенный к «нормальному состоянию» ( $0^\circ\text{C}$  и  $760$  мм рт. ст.), равен  $V_{\text{вп.}}$  куб. м на 1 кг сожженного топлива. Формулы (133) и (97) дают нам возможность вычислить эти величины на основании данных испытания существующей установки или на основании задания.

Пусть температура газов в рассматриваемом сечении  $= T^\circ\text{C}$ , их давление  $= H$  мм рт. ст., а полный объем газов, полученных при сгорании 1 кг топлива, равен  $V_{\text{тн}}$  куб. м. Последнее надо понять так: если все полученные при сгорании 1 кг топлива газы собрать и поместить в сосуд, объем которого равен  $V_{\text{тн}}$  куб. м, то они разовьют в нем давление, равное  $H$  мм рт. ст., если температура их будет равна  $T^\circ\text{C}$ .

Полное давление  $H$  мм рт. ст. в нашем случае складывается, по закону Дальтона, из суммы двух давлений, а именно: парциального давления сухих газов  $P_{\text{сг.}}$  мм рт. ст. и парциального давления водяных паров  $P_{\text{вп.}}$  мм рт. ст.

$$H = P_{\text{сг.}} + P_{\text{вп.}}$$

Само собой разумеется, что как сухие газы, так и водяные пары, развивая разные парциальные давления  $P_{\text{сг.}}$  и  $P_{\text{вл.}}$ , в сумме дающие полное давление  $H$  мм рт. ст., занимают один и тот же объем  $V_{\text{тн}}$  куб. м, а потому, на основании законов Бойля-Мариотта и Гей-Люссака, мы имеем:

Для сухих газов:

температуре  $T^{\circ}\text{С}$  и давлению  $P_{\text{сг.}}$  мм рт. ст. соответствует объем  $V_{\text{тн}}$  куб. м;

температуре  $0^{\circ}\text{С}$  и давлению  $P_{\text{сг.}}$  мм рт. ст. соответствует объем  $V_1$  куб. м;

температуре  $0^{\circ}\text{С}$  и давлению 760 мм рт. ст. соответствует объем  $V_{\text{сг.}}$  куб. м, откуда:

$$V_1 = V_{\text{тн}} \cdot \frac{273}{273 + T};$$

$$V_{\text{сг.}} = V_1 \cdot \frac{P_{\text{сг.}}}{760};$$

следовательно:

$$V_{\text{сг.}} = V_{\text{тн}} \cdot \frac{273}{273 + T} \cdot \frac{P_{\text{сг.}}}{760}. \quad (221)$$

Для водяных паров:

Совершенно аналогичным рассуждением найдем:

$$V_{\text{вл.}} = V_{\text{тн}} \cdot \frac{273}{273 + T} \cdot \frac{P_{\text{вл.}}}{760}. \quad (222)$$

Разделив равенство (221) на (222), получим:

$$\frac{V_{\text{сг.}}}{V_{\text{вл.}}} = \frac{P_{\text{сг.}}}{P_{\text{вл.}}}, \quad (223)$$

т. е. отношение парциальных давлений сухих газов и водяных паров в дымовых газах равно отношению их объемов, приведенных к нормальному состоянию ( $0^{\circ}\text{С}$  и 760 мм рт. ст.).

Из уравнения (223) мы имеем:

$$P_{\text{вл.}} = \frac{V_{\text{вл.}}}{V_{\text{вл.}} + V_{\text{сг.}}} \cdot (P_{\text{вл.}} + P_{\text{сг.}}), \quad (224)$$

а так как

$$P_{\text{вл.}} + P_{\text{сг.}} = H, \quad (220)$$

то имеем:

$$P_{\text{вл.}} = \frac{V_{\text{вл.}}}{V_{\text{вл.}} + V_{\text{сг.}}} H, \quad (225)$$

НВ  
УДМУНТ  
(ДИТ)

или окончательно:

$$P_{\text{вп.}} = \frac{V_{\text{вп.}}}{V_{\text{пс.}}} \cdot H, \quad (226)$$

где  $V_{\text{пс.}}$  — полный объем продуктов сгорания для 1 кг топлива, приведенный к «нормальному состоянию» ( $0^\circ\text{C}$  и 760 мм рт. ст.). (См. формулу 134.)

Подсчитавши по формуле (226) парциальное давление водяных паров  $P_{\text{вп.}}$  и пользуясь таблицей зависимости температуры насыщенного пара от его давления, мы находим температуру насыщенного пара, соответствующую определенному давлению  $P_{\text{вп.}}$  мм рт. ст.

В отделе приложений мной приведены таблица V для насыщенного пара от  $10^\circ$  до  $50^\circ\text{C}$  (см. стр. 205) и таблица IV для насыщенного пара от  $-20^\circ$  до  $+9^\circ\text{C}$  (см. стр. 204), заимствованные мною из книги Prof. W. Schüle «Technische Thermodynamik» (4 изд., 1923 г., I том, стр. 552 — 553), которыми можно воспользоваться для определения температуры точки росы.

Зависимость температуры, соответствующей точке росы, от содержания углекислоты в дымовых газах при полном сгорании топлив разного рода иллюстрируется фигурой 7.

Из рассмотрения этой фигуры мы видим, что точка росы зависит не только от рода топлива, но и от его влажности и от способа сжигания.

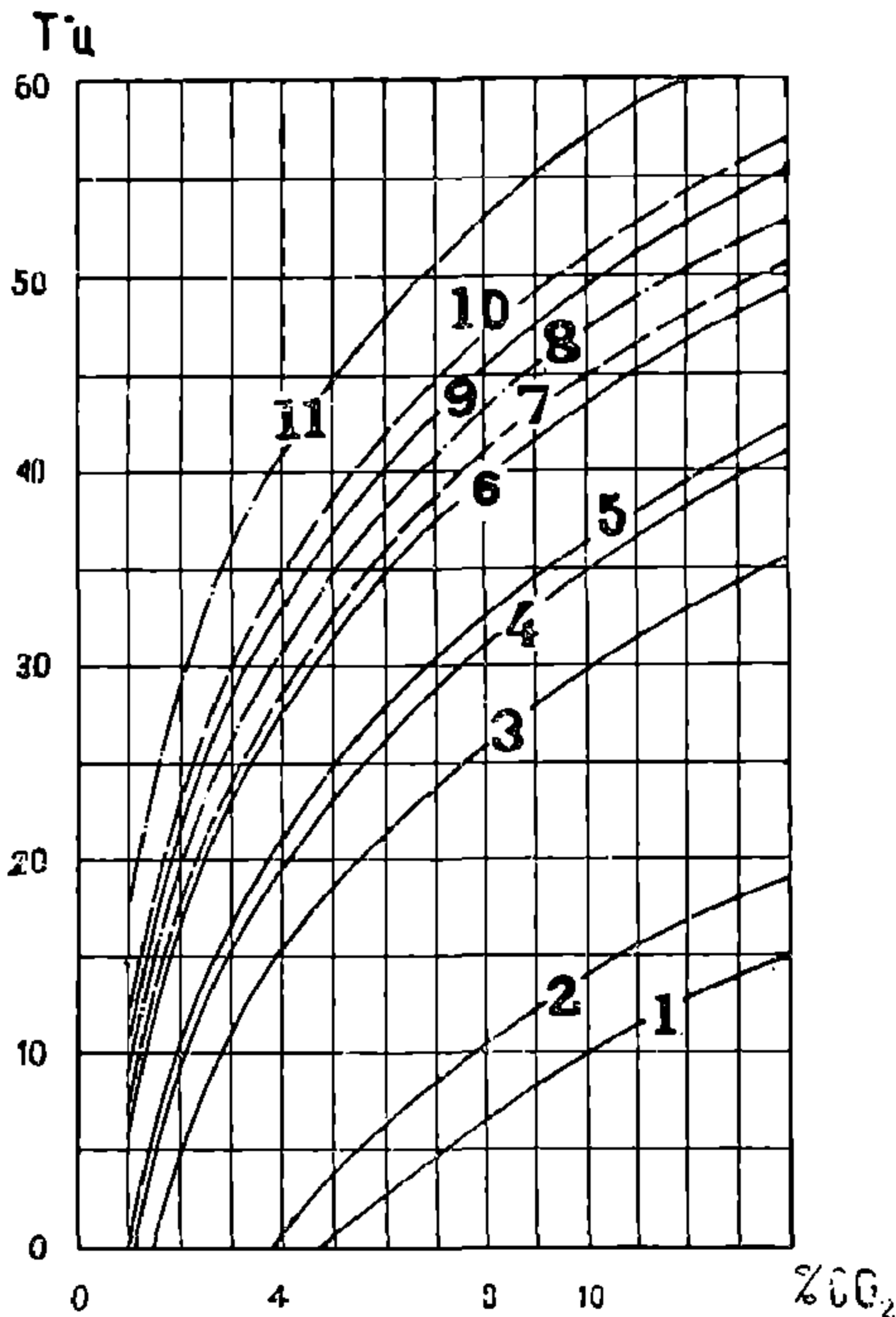
Так, например, при работе на дровах с влажностью 25% (кривая 8) и при содержании углекислоты в дымовых газах 6%, температура, соответствующая точке росы, будет  $38^\circ\text{C}$ , при работе же на дровах с влажностью 50% (кривая 11) и при том же содержании углекислоты в дымовых газах, точка росы наступает уже при  $48^\circ\text{C}$ .

Влияние способа сжигания топлива на изменение точки росы в дымовых газах можно усмотреть хотя бы из сравнения сжигания антрацита с содержанием балласта  $B = A + S + W = 11\%$  при вентиляторном («сухое дутье») и паровом дутье. Так, при содержании углекислоты в дымовых газах 12% по объему сухих газов мы имеем температуру, соответствующую точке росы, при работе на вентиляторном дутье  $12,5^\circ\text{C}$  (кривая 1), а при работе на паровом дутье  $38^\circ\text{C}$  (кривая 4).

Следовательно, при оборудовании котельной экономайзером и желании избежать его потения необходимо в каждом конкретном случае выяснить температуру, соответствующую точке росы, и уже

в зависимости от ее величины выбирать желательную температуру воды при входе в экономайзер.

Я не считаю возможным дольше задерживаться на этом чрезвычайно простом по существу вопросе, но к сожалению не всегда учитываемом на практике, и предлагаю читателю самому проследить по фигуре 7 изменение температуры, соответствующей



Фиг. 7. Диаграмма изменения точки росы в зависимости от процентного содержания углекислоты в продуктах сгорания различных топлив при условии полного сгорания ( $CO = \text{нулю}$ ).

1. Антрацит химич. состава органич. массы:  
 $C_0 = 97,30\%$ ,  $H_0 = 1,30\%$   
 при  $W = 40\%$  и  $B = A + S + W = 110\%$   
 $W_{\phi} = 0$ .
2. Антрацит того же химич. состава:  
 при  $W = 80\%$  и  $B = A + S + W = 130\%$   
 $W_{\phi} = 0$ .
3. Каменный уголь химич. сост. орг. массы:  
 $C_0 = 80\%$ ,  $H_0 = 5,70\%$   
 при  $W = 50\%$  и  $B = A + S + W = 120\%$   
 $W_{\phi} = 0$ .
4. Антрацит химич. состава органич. массы:  
 $C_0 = 97,30\%$ ,  $H_0 = 1,30\%$   
 при  $W = 40\%$  и  $B = A + S + W = 110\%$   
 $W_{\phi} = 0,6$ .
5. Антрацит того же химич. состава:  
 при  $W = 80\%$  и  $B = A + S + W = 130\%$   
 $W_{\phi} = 0,6$ .
6. Подмосковный курный уголь химич. состава органич. массы:  
 $C_0 = 75,40\%$ ,  $H_0 = 5,40\%$   
 при  $W = 300\%$  и  $B = A + S + W = 300\%$ .
7. Торф химич. состава органич. массы:  
 $C_0 = 58\%$ ,  $H_0 = 6\%$   
 при  $W = 250\%$  и  $B = A + S + W = 300\%$ .
8. Дрова при  $W = 250\%$ .
9. Нефтяные остатки при  $W_{\phi} = 0,6$ .
10. Торф химич. состава органич. массы:  
 $C_0 = 58\%$ ,  $H_0 = 6\%$   
 при  $W = 400\%$  и  $B = A + S + W = 450\%$ .
11. Дрова при  $W = 500\%$ .

началу конденсации водяных паров в дымовых газах, в зависимости от содержания углекислоты в них для топлива разного рода как при различном содержании в нем влаги и золы, так и в зависимости от способов его сжигания.

В формулу (225) для определения точки росы входит лишь отношение приведенных объемов и барометрическое давление, которые совершенно не зависят от температуры дымовых газов, следовательно и температура, соответствующая точке

ДУДИТ  
(ДУДИТ)

росы, зависит лишь от состава дымовых газов, но совершенно не зависит от их температуры.

*Пример 20.* Определить температуру точки росы, если известно, что дымовые газы получены из подмосковного угля следующего состава: углерода 38,33%, водорода 3,13%, кислорода 7,06%, азота 0,65%, серы 3,58%, золы 15,75% и влаги 31,50% и имеют избыток воздуха 80% против теоретического.

*Решение.* Согласно примеру 14 (стр. 82) имеем:

$$\text{CO}_2 + \text{SO}_2 = 10,09;$$

по формуле (133):

$$V_{\text{сг.}} = \frac{38,33 + 0,375 \cdot 3,58}{0,536 \cdot 10,09} = 7,34;$$

по формуле (97):

$$V_{\text{вл.}} = \frac{0,01 (9 \cdot 3,13 + 31,5) + 0,0137^1) \cdot 1,8 \cdot 5,359^2)}{0,8043} = 0,91;$$

по формуле (99):

$$V_{\text{ис.}} = 7,34 + 0,91 = 8,25.$$

Считая барометрическое давление 740 мм рт. ст., имеем по формуле (226) парциальное давление водяных паров:

$$P_{\text{вл.}} = \frac{0,91}{8,25} \cdot 740 = 81,6,$$

чему по таблице V (стр. 205) отвечает:

$$t_{\text{р.}} = 47,5^\circ \text{C}.$$

Это решение получено, принимая относительную влажность воздуха 50% при температуре его 30° С.

Если пренебречь влагой воздуха, т.-е. принять  $\psi = 0$ , то получим:

$$V_{\text{вл.}} = \frac{9 \cdot 3,13 + 31,5}{80,43} = 0,74;$$

$$V_{\text{ис.}} = 7,34 + 0,74 = 8,08;$$

$$P_{\text{вл.}} = \frac{0,74}{8,08} \cdot 740 = 67,7,$$

чему отвечает по таблице V

$$t_{\text{р.}} = 43,8^\circ \text{C}.$$

<sup>1)</sup> См. пример 6, стр. 28.

<sup>2)</sup> См. пример 7, стр. 27.



## ГЛАВА ДВАДЦАТАЯ.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА.

Теоретическая температура сгорания топлива ( $T_r$ , °C) есть та температура, до которой могут быть нагреты продукты сгорания за счет тепла, выделенного топливом при его полном сгорании и при условии, что все тепло, внесенное в топку и полученное при полном сгорании топлива, будет использовано исключительно на нагрев образовавшихся после сгорания топлива газов.

Последнее условие проще всего можно выразить следующим уравнением:

$$Q_r = G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}} \cdot T_r, \quad (227)$$

где  $G_{\text{пс.}}$  — вес продуктов сгорания 1 кг топлива, а  $C_{\text{пс.}}$  — средняя теплоемкость их (от 0 до  $T_r$ , °C) в кал/кг °C, подсчитать которую возможно, зная состав полученных газов (см. главу VII и след.).

Определением  $Q_r$  мы занимались в главе XVI.

Для вычисления произведения  $G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}}$  проще всего воспользоваться равенством:

$$G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}} = V_{\text{сг.}} \cdot C_{\text{сг.}} + G_{\text{вп.}} \cdot C_{\text{вп.}}, \quad (228)$$

где  $V_{\text{сг.}}$  определяется по формуле (133), внося в нее содержание  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$  в топке;  $G_{\text{вп.}}$  определяется по формуле (92), а  $C_{\text{сг.}}$  и  $C_{\text{вп.}}$  находятся по формулам (184) и (185), подставляя в них вместо  $T$  искомую величину  $T_r$ .

Итак, для определения теоретической температуры сгорания топлива имеем квадратное уравнение с одним неизвестным, один из корней которого дает искомую нами величину  $T_r$ .

Практически можно избежать решения квадратного уравнения, если предварительно задавшись ожидаемой температурой  $T_r$  и, определив по ней на основании формул (184) и (185) (или по графику фиг. 5) средние теплоемкости  $C_{\text{сг.}}$  и  $C_{\text{вп.}}$ , подставить их затем в формулу:

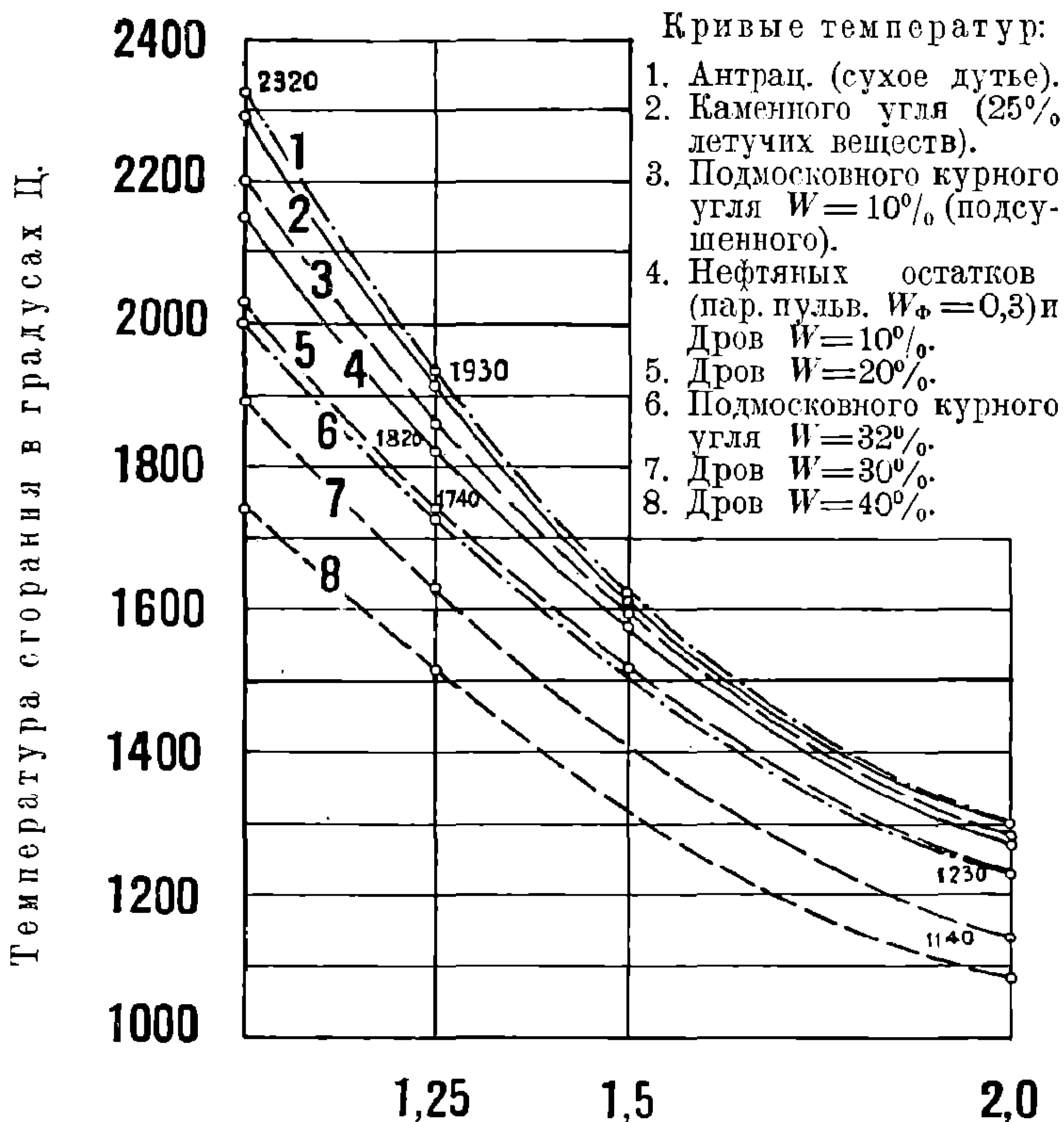
$$T_r = \frac{Q_r}{V_{\text{сг.}} \cdot C_{\text{сг.}} + G_{\text{вп.}} \cdot C_{\text{вп.}}}. \quad (229)$$

Если определяемая температура  $T_r$  будет отлична от той, которой первоначально задавались для нахождения  $C_{\text{сг.}}$  и  $C_{\text{вп.}}$ , то вычисление необходимо повторить.

УДУНТ  
(ДНТ)

Опыт убеждает нас, что означенный метод подстановки при некотором навыке быстрее приводит к цели, особенно если учесть трудность замера высоких температур и допустимые неточности в подсчетах.

Если проанализировать формулу (229), то мы обнаружим очень сильную зависимость теоретической температуры горения ( $T_r$ ) не только от коэффициента избытка воздуха в топке ( $\alpha_T$ ), но и от рода топлива и метода его сжигания.



Коэффициент избытка воздуха  $\alpha_T$ .

Фиг. 8. Изменение теоретической температуры сгорания  $T_r$  в зависимости от рода топлива и от  $\alpha_T$  (при полном сгорании).

Зависимость эта видна также из графика (см. фиг. 8), заимствованного нами из работ проф. К. В. Кирша, который построил его для полного сгорания топлива, не считаясь с влажностью воздуха.

Сравнивая, например, температуру сгорания сухих и сырых дров при одних и тех же избытках воздуха, мы видим, что

УДУНТ  
(ДИТ)

практически сухие дрова с содержанием 20% влаги (кривая 5) дают более высокие температуры сгорания, чем влажные дрова с содержанием влаги 30 и 40% (кривые 7 и 8). Точно также можно доказать, что паровое дутье понижает теоретическую температуру сгорания и т. д.

*Пример 21.* Выяснить разницу в теоретических температурах сгорания для антрацита с содержанием: углерода 85,86%, водорода 1,75%, кислорода и азота 1,16%, серы 1,57%, золы 4,89% и влаги 4,77%, имеющего низшую теплопроизводительность по бомбе 7263 кал/кг, в следующих условиях сжигания:

1) антрацит сжигается на колосниковой решетке с паровым дутьем при расходе перегретого пара ( $P = 4$  атм. абс.;  $t = 200^\circ \text{C}$ ) на дутье в количестве 0,4 кг на 1 кг антрацита; воздух берется из котельной при температуре его  $30^\circ \text{C}$  с относительной влажностью 50% и расходуется с избытком в 30% против теоретически необходимого;

2) те же условия, но воздух подается в топку вентилятором, без расхода пара на дутье.

*Решение.* 1) По формуле (70) имеем:

$$\beta = 2,373 \frac{1,75 - 0,125}{85,86 - 0,375} \frac{1,16}{1,57} = 0,045.$$

Считая сгорание полным, найдем по формулам (87), (88), (89) и (96):

$$\lambda = 19,77;$$

$$\mu = 0,01$$

$$\text{CO}_2 + \text{SO}_2 = 15,33;$$

$$V_{\text{сг.}} = 10,53.$$

По формуле (92):

$$G_{\text{вп.}} = 0,7935.$$

В примере 16 (стр. 90) мы имели:

$$Q_{\text{т.}} = 7757;$$

следовательно по формуле (229) получим:

$$T_{\text{г.}} = \frac{7757}{10,53 \cdot 0,368 + 0,7935 \cdot 0,54} = 1803^\circ \text{C}.$$

2) В этом случае изменяется  $Q_{\text{т.}}$  и  $G_{\text{вп.}}$ , а именно:

$$Q_{\text{т.}} = 7757 - 273^1) = 7484;$$

$$G_{\text{вп.}} = 0,7935 - 0,4 = 0,3935.$$

Следовательно по формуле (229) найдем:

$$T_{\text{г.}} = \frac{7484}{10,53 \cdot 0,3639 + 0,3935 \cdot 0,5415} = 1827^\circ \text{C}.$$

<sup>1)</sup> См. пример 16 на стр. 90, где  $i_{\text{ф.}}$   $W_{\text{ф.}} = 273$ .

**Пример 22.** Выяснить влияние избытка воздуха на теоретическую температуру сгорания подмосковного угля с содержанием: углерода 38,33%, водорода 3,13%, кислорода 7,06%, азота 0,65%, серы 3,58%, золы 15,75% и влаги 31,50%, если для сгорания подается воздух при температуре 30° С с относительной влажностью 50%.

**Решение.** Считая сгорание полным и задаваясь избытками воздуха 0%, 40%, 60% и 100% против теоретически необходимого, найдем:

ТАБЛИЦА 13.

При $\alpha_{т.} =$	1,0	1,4	1,6	2,0
$T^{\circ} C =$	1968	1536	1385	1165

С увеличением избытка воздуха в топке теоретическая температура уменьшается.

**Пример 23.** Как изменится теоретическая температура сгорания подмосковного угля, указанного в предыдущей задаче состава, если в топку будет подаваться воздух, имеющий относительную влажность 50% при температуре 30°С, и подогретым до 200°С с коэффициентом избытка 1,4?

**Решение.** В этом случае возрастет количество тепла, вводимого в топку с воздухом, за счет чего теоретическая температура сгорания поднимется до 1651°С, вместо имевшей место ранее 1536°С.

Следовательно предварительный подогрев воздуха способствует повышению теоретической температуры сгорания топлива.

**Пример 24.** Как изменится теоретическая температура сгорания подмосковного угля при коэффициенте избытка воздуха 1,4, если уголь подавать в топку подсушенным до содержания влаги 10%?

**Решение.** Прежде всего необходимо, пользуясь формулой (17), определить рабочий состав подсушенного угля:

$$C = 38,33 \cdot \frac{100 - 10}{100 - 31,5} = 50,36\%$$

$$H = 3,13 \cdot \frac{100 - 10}{100 - 31,5} = 4,11\%$$

$$N = 0,65 \cdot \frac{100 - 10}{100 - 31,5} = 0,85\%$$

$$O = 7,06 \cdot \frac{100 - 10}{100 - 31,5} = 9,28\%$$

$$S = 3,58 \cdot \frac{100 - 10}{100 - 31,5} = 4,7\%$$

$$A = 15,75 \cdot \frac{100 - 10}{100 - 31,5} = 20,7\%$$

---


$$\text{Итого.} \quad . 90\% + 10\% = 100\%.$$

Рабочая теплопроизводительность 1 кг угля находится по формуле (5):  
 $Q_{\text{раб.}} = 81 \cdot 50,36 + 300 \cdot 4,11 - 26 \cdot (9,28 - 4,7) - 6 \cdot (9 \cdot 4,11 + 10) = 4911 \text{ ккал/кг.}$

УЧЕБНИК  
УДУНТ  
(ДИТ)

Далее, по формулам (96) и (92) находим:

$$\begin{aligned} V_{\text{ст.}} &= 7,463; \\ G_{\text{вл.}} &= 0,5727 \end{aligned}$$

и, наконец, по формуле (229) имеем:

$$T_{\text{г.}} = 1663^{\circ}\text{C.}$$

Сравнивая ее с  $T_{\text{г.}} = 1536^{\circ}\text{C}$ , имевшей место при влажном рабочем топливе в примере 22, заключаем, что предварительное подсушивание топлива способствует повышению теоретической температуры сгорания его при том же избытке воздуха.

## ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ПЕРВАЯ.

### ТЕПЛОПЕРЕДАЧА.

На фиг. 9 показана схема перехода тепла через стенку от нагретых газов к нагреваемой жидкости, пару или воздуху.

Газ, имеющий температуру  $T^{\circ}\text{C}$ , течет по газоходу, который изолируется от окружающей среды стенкой 1 — 1, имеющей температуру  $T_{\text{ст.}}$ , и отдает свое тепло носителю (воде, пару или газу) через стенку 2 — 2.

На практике обычно стенка никогда не бывает чистой; на ней имеется слой сажи и золы («наружное» загрязнение стенки) и слой накипи, масла и грязи («внутреннее» загрязнение стенки).

При установившемся режиме мы, очевидно, имеем различную температуру с наружной и с внутренней стороны стенки, через которую передается тепло от нагревающего тела к нагреваемому.

Условимся в следующих обозначениях:

для «внешнего» загрязняющего слоя:

$\vartheta_1$  — температура на его внешней поверхности (со стороны, омываемой газами);

$\lambda_1$  — коэффициент теплопроводности загрязняющего слоя;

$\delta_1$  — его толщина в метрах;

$\vartheta_2$  — температура на его внутренней поверхности (обращенной к стенке, разделяющей нагреваемое тело от нагревающего);

для стенки, разделяющей нагреваемое тело от нагревающего:

$\vartheta_3$  — температура на ее наружной поверхности (со стороны, подверженной загрязнению золою);

УДКУНБ  
УДУНТ  
(ДИТ)

$\lambda_2$  — коэффициент теплопроводности стенки;  
 $\delta_2$  — толщина ее в метрах;  
 $\vartheta_4$  — температура на ее внутренней поверхности (со стороны, подверженной загрязнению накипью);

для «внутреннего» загрязняющего слоя:

$\vartheta_3$  — температура на его внутренней поверхности (со стороны стенки);

$\lambda_3$  — коэффициент теплопроводности загрязняющего слоя;

$\delta_3$  — толщина его в метрах;

$\vartheta_6$  — температура на его наружной поверхности (омываемой нагреваемым телом).

Через  $t$  обозначим температуру нагреваемого тела ( $^{\circ}\text{C}$ ).

На основании наших теоретических познаний и практических наблюдений мы знаем, что тепло от нагревающих тел к нагреваемым передается двумя путями:

1) непосредственным соприкосновением нагревающего тела с нагреваемым и

2) лучеиспусканием от накалиной поверхности горячего тела на нагреваемую поверхность.

Следовательно все тепло, перетекающее через данную поверхность нагрева в час ( $Q$  калорий), складывается из двух величин: из тепла, переданного путем соприкосновения ( $Q_c$  калорий) и из тепла, переданного путем лучеиспускания ( $Q_d$  калорий), при чем:

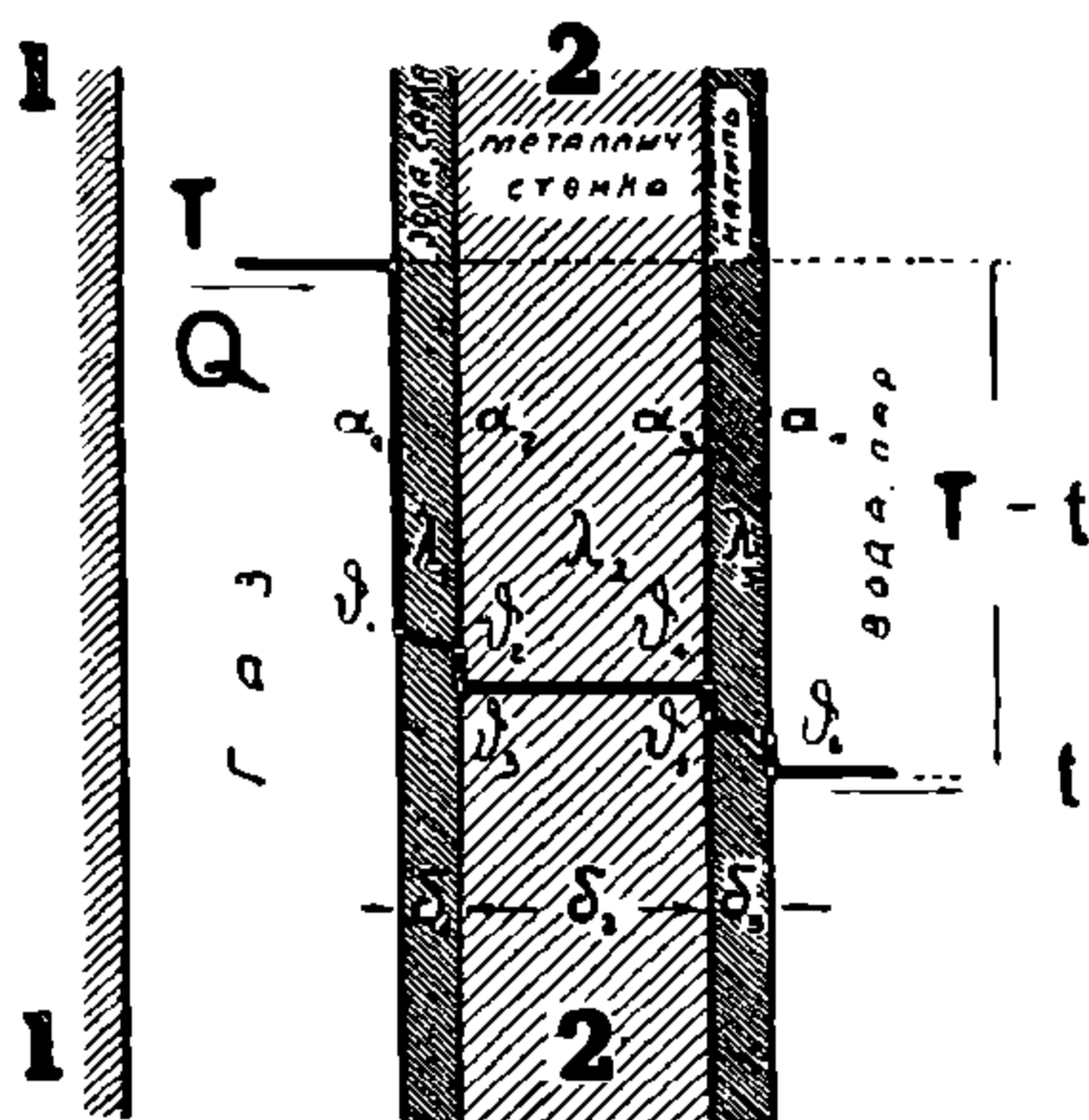
$$Q = Q_c + Q_d. \quad (230)$$

Закон Редтенбахера дает нам возможность определить переход тепла чистым соприкосновением, пользуясь следующей формулой:

$$Q_c = \alpha \cdot H_c \cdot (T - t), \quad (231)$$

где:

$\alpha$  — коэффициент, характеризующий переход тепла от нагревающего тела к нагреваемому в  $\frac{\text{калориях}}{\text{кв. метр } ^{\circ}\text{C час.}}$



Фиг. 9. Схема перехода тепла через стенку от нагретых газов к нагреваемым носителям тепла (вода, пар, воздух и т. п.).

$H_c$  — поверхность нагрева, воспринимающая тепло, в кв. метрах;

$T$  — температура нагревающего тела в °С;

$t$  — » нагреваемого » »

Закон Стефана-Больцмана дает нам возможность определить переход тепла путем чистого лучеиспускания, пользуясь следующей формулой:

$$Q_{\text{л.}} = C \cdot \varphi \cdot H_{\text{л.}} \cdot \left[ \left( \frac{T + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (232)$$

где:

$C$  — коэффициент лучеиспускания, равный от 0,8 — для полированной меди до 4,6 — для абсолютно черного тела;

$\varphi$  — доля лучей, попадающих на тепловоспринимающую поверхность;

$H_{\text{л.}}$  — нагретая поверхность, испускающая тепловые лучи (кв. метры);

$T$  — температура ее (°С);

$t$  — » тепловоспринимающей поверхности (°С).

Коэффициент лучеиспускания может быть выражен формулой:

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_3}}, \quad (232^a)$$

где:

$C_1$  — коэффициент, характеризующий излучение тела, испускающего тепло;

$C_2$  — коэффициент, характеризующий излучение тела, воспринимающего тепло;

$C_3$  — коэффициент, характеризующий излучение абсолютно-черного тела.

Вамслер (Wamsler) дает следующие значения для коэффициентов излучения:<sup>1)</sup>

абсолютно-черное тело	4,61
чугун, шероховатый, окисленный	. 4,48
ламповая сажа	. 4,44
железо, слабо окисленное	4,40
латунь, матовая поверхность	1,03
медь, слабо полированная	0,79

<sup>1)</sup> F. Tetzner. Die Dampfkessel. Berlin. 1923 г. 23 стр.

Практически очень трудно пользоваться этими уравнениями и потому предпочитают даже при наличии лучеиспускания (что всегда имеет место) пользоваться одной лишь формулой Редтенбахера, как наиболее простой, учитывая ее неточность соответственным выбором величины коэффициента теплопередачи.

Так как на практике мы никогда не имеем дело с чистыми стенками, ибо обычно последние бывают загрязнены как с «наружной», так и с «внутренней» стороны, то мы и разберем здесь этот более сложный случай загрязненной стенки.

Формула Редтенбахера может быть написана в следующем виде:

$$Q = K \Pi \cdot (T - t), \quad (233)$$

где:

$Q$  — тепло, переданное воде (калорий в час);

$K$  — коэффициент теплопередачи, учитывающий все тепло, передаваемое нагревающим телом как путем лучеиспускания, так и соприкосновением, называемый иногда общим коэффициентом теплопередачи;

$T$  — температура нагревающего тела (дымовых газов);

$t$  — температура нагреваемого тела (вода, пар, воздух и т. д.).

Пользуясь фиг. 9, рассмотрим переход тепла от газа к воде или пару при наличии между ними загрязненной разделяющей их стенки.

Так как мы рассматриваем процесс установившийся, то очевидно, что сколько тепла воспринимается наружной поверхностью золотого налета от газов за данный промежуток времени, столько же ею передается и далее.

В самом деле, если бы мы допустили, что наружная поверхность золотого налета воспринимает тепла от газа больше (или меньше), чем передает его далее, то это значило бы, что в золотом налете имеется какое-то накопление (или убывание) тепла, а это возможно лишь при повышении (или понижении) его температуры, в связи с чем будут изменяться и температуры на его поверхностях  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$ , чего при наличии установившегося состояния быть не должно.



Итак, при установившемся режиме мы имеем следующие очевидные равенства для количества тепла, протекающего через заданную поверхность нагрева  $H$  кв. м за час:

$$\left. \begin{aligned} Q &= \alpha_1 \cdot (T - \vartheta_1) \cdot H \\ Q &= \frac{\lambda_1}{\delta_1} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \cdot H \\ Q &= \alpha_2 \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_3) \cdot H \\ Q &= \frac{\lambda_2}{\delta_2} \cdot (\vartheta_3 - \vartheta_4) \cdot H \\ Q &= \alpha_3 \cdot (\vartheta_4 - \vartheta_5) \cdot H \\ Q &= \frac{\lambda_3}{\delta_3} \cdot (\vartheta_5 - \vartheta_6) \cdot H \\ Q &= \alpha_4 \cdot (\vartheta_6 - t) \cdot H \end{aligned} \right\}, \quad (234)$$

где коэффициент:

- $\alpha_1$  — учитывает переход тепла от газа на поверхность золотого налета;
- $\alpha_2$  — учитывает переход тепла от золотого налета к поверхности стенки;
- $\alpha_3$  — учитывает переход тепла от стенки к накипи, и, наконец,
- $\alpha_4$  — учитывает переход тепла от накипи к воде, пару или воздуху.

Все эти коэффициенты показывают, какое количество тепла протекает в час через один кв. м поверхности нагрева при наличии разницы в температурах соответствующих тел, равной одному градусу С.

На основании формулы (234) имеем:

$$\left. \begin{aligned} T - \vartheta_1 &= \frac{Q}{H} \cdot \frac{1}{\alpha_1} \\ \vartheta_1 - \vartheta_2 &= \frac{Q}{H} \cdot \frac{\delta_1}{\lambda_1} \\ \vartheta_2 - \vartheta_3 &= \frac{Q}{H} \cdot \frac{1}{\alpha_2} \\ \vartheta_3 - \vartheta_4 &= \frac{Q}{H} \cdot \frac{\delta_2}{\lambda_2} \\ \vartheta_4 - \vartheta_5 &= \frac{Q}{H} \cdot \frac{1}{\alpha_3} \\ \vartheta_5 - \vartheta_6 &= \frac{Q}{H} \cdot \frac{\delta_3}{\lambda_3} \\ \vartheta_6 - t &= \frac{Q}{H} \cdot \frac{1}{\alpha_4} \end{aligned} \right\} \quad (235)$$

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)

Складывая почленно обе стороны равенства (235) получим:

$$T - t = \frac{Q}{H} \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_3} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_4} \right), \quad (236)$$

но так как

$$Q = K \cdot H \cdot (T - t), \quad (233)$$

то следовательно:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_3} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_4}}, \quad (237)$$

при чем коэффициент  $K$  носит название общего коэффициента теплопередачи от нагревающего тела к нагреваемому (в нашем случае от горячих дымовых газов к воде, пару или воздуху).

В частном случае при чистой стенке мы будем иметь:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_4}}, \quad (238)$$

Опыт учит нас, что, при переходе тепла от газов через чистую стенку к воде или пару, в виду относительной малости двух последних слагаемых  $\frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_4}$  в знаменателе по сравнению с первым  $\frac{1}{\alpha_1}$  ими можно пренебречь,<sup>1)</sup> и тогда мы получим:

$$K \approx \alpha_1 \quad (239)$$

Следовательно общий коэффициент теплопередачи для чистой стенки в данном случае приблизительно равен коэффициенту  $\alpha_1$ , учитывающему все тепло как лучеиспусканием, так и соприкосновением, переданное от газа к чистой стенке.

Если сложить почленно 4 последних равенства (235), то получим:

$$\delta_3 - t = \frac{Q}{H} \cdot \left( \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_3} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_4} \right), \quad (240)$$

откуда

$$\delta_3 = t + \frac{Q}{H} \cdot \left( \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_3} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_4} \right). \quad (241)$$

<sup>1)</sup> Для железных стенок в котлах мы обычно имеем  $\lambda_2 = 50$ , а  $\delta_2$  от 3 до 15 мм и, следовательно,  $\frac{\delta_2}{\lambda_2}$  от 0,00006 до 0,0003; величина же  $\alpha_4$  для кипящей воды от 4000 до 6000; следовательно  $\frac{1}{\alpha_4} =$  от 0,00016 до 0,00025, т.-е. сумма  $\frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_4} \gg 0,0006$  против  $\frac{1}{\alpha_1} \ll 0,02$ , так как  $\alpha_1$  обычно равняется от 10 до 50.

		Стенка		Внешнее загрязнение		Внутреннее загрязнение	
		$\delta_2, m$	$\lambda_2$	$\delta_1$	$\lambda_1$	$\delta_3$	
Экономайзер Грина.	15	0,01	50	0	0	0	0
				0	0	0,002	»
	»	»	»	»	»	0,005	2
	»	»	»	0,002	0,2	0,010	0
Вторые хода водотрубных котлов $T_{ср.} \approx 400^\circ$ .	20	0,003	50 жел.	0	0	0,005	0
	»	»	300 медь.	0	0	0	0
		»	50	0	0	0,002	0
				0,002 сажа зола.	0,2	0	0
				0	0	0,002	2,0 наклон
				0	0	0,005	2,0 наклон
				0	0	0,001	0,15 масло
				0	0,2	0,005 + 0,001	2,0 0,15
Первые хода водотрубных котлов. <sup>1)</sup>	30	0,003	50	0	0	0	0
		»		0,002	0,2	0	0
	»	»	»	»	»	0,005	2,0
Начало 1-го хода 2—3-й ряд труб, не по- лучающий теплоты пря- мым излучением топки.	50	0,003	50	0	0	0	0
		»	»	0	0	0,005	2,0
	»			0	0	0,010	2,0

<sup>1)</sup> За вычетом работы топки.

ТАБЛИЦА 14.

$a_4$	$K$	Средняя разность $T - t$	Число кало- рий, проход. через 1 кв. м в 1 ч. и число кг норм. пара с 1 кв. м в 1 ч. ( $Q : H$ и $D : H$ )	Превышение температуры стенки $\Delta t$ над температу- рой воды $t$	$\vartheta_3$
2 000 циркул.)	14,8	$\approx 150^\circ$	2 220 3,5	$t + 1,5$	
500 Пяти сто- вая вода.	14,45				
2 000	14,25				
	12,87				
5 000	19,87	$200^\circ$	3 980 6,2	$197 + 1 =$	$198^\circ$
»	19,92	»			
1 000	19,60		3 940	$197 + 4 =$	$201^\circ$
5 000	16,60		3 320	$197 + 1 =$	$198^\circ$
	19,53		3 910	$197 + 5 =$	$202^\circ$
	19,0		3 800	$197 + 10,5 =$	207,5
	17,58		3 500	$197 + 24,5 =$	221,5
	14,4		2 880 4,7	$197 + 27,5$	224,5
5 000	29,77	$600^\circ$	17 860 28,1	$107 + 4,7$	201,7
	22,9	»	13 740		
»	27,7	»	16 620	$197 + 46 =$	243
5 000	49,35	$800^\circ$	39 480 62	$197 + 10 =$	207
»	43,9	»	35 120	$197 + 97 =$	294
	39,6		31 680 50	$197 + 167 =$	364

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)

		Стенка		Внешнее загрязнение.		Внутреннее загрязнение	
		$\delta_2, m$	$\lambda_2$	$\delta_1$	$\lambda_1$	$\delta_3$	$\lambda_3$
Топочное пространство горизонтально-водотрубного котла. Напряжение котла 25 кг пара на 1 кв. м в час $D/H = 25$ $a = 1,3$ .	(130)	0,003	50	0	0	0	С
	»	»	»	0	0	0,002	2,0
	»	»	»	0	0	0,005	2,0
	»	»	»	0	0	0,010	2,0
	»	»	»	0,001	0,2	0,005	2,0
Тоже $D/H \approx 40$ $a = 1,2$ .	(270)	0,003	50	0	0	0	0
	»	»	»	0	0	0,002	0,2
Жаровая труба комбинир. котла диам. = 900 м. Напряжение решетки. $\frac{B}{R} = 200$ кг/кв. м ч.; $a = 1,3$ .	(160)	0,012	50	0	0	0	0
	»	»	»	0	0	0,002	2,0
Перегреватель противоток (газ—перегр. пар).	40	0,004	50	0	0	0	0
	»	»	»	0	0	0	0
	»	»	»	0	0	0,002	2,0
	50	»	»	0	0	0	0
Воздушный подогреватель газ—воздух.	15	0,01	50	0	0	0	0
	»	»	»	0,002	0,2	0	0
Паровой подогреватель насыщенный пар—конденсирующийся. Хорошее удаление воздуха и отвод конденсата.	10 000	0,002	50 железн.	0	0	0	0
	»	»	»	0	0	0	0
	»	0,0015	300 медь.	0	0	0	0
	»	0,002	50	0	0	0,002 накипь.	0,2
	»	»	»	0,001	0,15 масло.	0	0
Неконденсирующ. перегр. пар—вода больш. скор.	200	0,002	50	0	0	0	0
Вода—вода.	500 мало подв.	0,002	50	0	0	0	0
	2000 цирк.	0,002	»	0	0	0	0

<sup>1)</sup> Знак вопроса наш. А. И.

Продолжение.

$\sigma_4$	$K$	Средняя разность $T - t$	Число калорий, проход. через 1 кв. м 1 ч. и число кг норм. пара с 1 кв. м в 1 ч. ( $Q : H$ и $D H$ )	Превышение температуры стенки $\Delta t$ над температу- рой воды $t$	$\vartheta_3$
5 000	(170) $\sigma=0,30$	$\approx 1200^\circ$	200 000 315	197+52=	249
	(147) $\sigma=0,26$		176 000	197+222=	419
	(121) $\sigma=0,21$		145 000	197+400=	597°
	93		111 600	197+587=	784°
	75		90 000	197+248=	445
5 000	(250)	$\approx 1300^\circ$	300 000 470	197+78=	275
	(202)		242 000	197+305=	502
5 000	$\approx 170?^1)$	$\approx 1200^\circ$	200 000 315	197+88=	385?^1)
	144?^1)		173 000	197+249=	446?^1)
200	33,5	700—350= =350 max	11 720 18,6	350+60= противоток.	410
100	28,0		9 800	350+99=	449
	26,0		9 100	350+101=	451
	33,2	900—350°	17 600	370+180=	550°
30 (скорость).	10,0	$\approx 150^\circ$			
	9,1				
500 мало п дв. вода.	470				
2 000 фрк. вода.	1 560				
2 000	1 670				
2 000	610				
»	137				
500	142				
500	246				
500	470				

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)

Пренебрегая в формулах (237) и (241) коэффициентами, учитывающими переход тепла от загрязняющего слоя к стенке и обратно, т.-е. полагая равенство температур на соприкасающихся поверхностях слоя и стенки, получим упрощенные формулы, которыми можно пользоваться для расчетов:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_4}} \quad . (242)$$

$$\vartheta_3 = t + \frac{Q}{H} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_4} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right); \quad . (243)$$

Если загрязняющий слой или сама стенка состоят из нескольких слоев, то нужно соответствующее отношение  $\frac{\delta}{\lambda}$  заменить суммой отношений  $\frac{\delta}{\lambda}$  для каждой части слоя.

Формула (243) позволяет нам определить температуру на поверхности стенки котла, обращенной в сторону газов. Из рассмотрения ее ясно, что чем больше  $\alpha_4$ , т.-е. чем сильнее циркуляция нагреваемого тела (воды, пара или воздуха), тем менее температура стенки будет отличаться от температуры нагреваемого тела  $t^\circ \text{C}$ .

Внутренние загрязнения (накипь, масло) повышают температуру стенки; наружные загрязнения (зола) ее понижают.

Какое значение оказывает загрязнение стенок на коэффициент теплопередачи  $K$  и на температуру самой стенки  $\delta_3$ , можно усмотреть из таблицы 14, вычисленной проф. К. В. Кирш. <sup>1)</sup>

В дополнение таблицы 14 можно привести для коэффициентов, характеризующих передачу тепла от стенки к пару, воде и воздуху, более новые данные, дословно взятые мною из Hütte: <sup>2)</sup>

*«1) Для кипящей воды можно принимать  $\alpha =$  от 4000 до 6000; при хорошей циркуляции жидкости  $\alpha$  увеличивается, при недостаточной — уменьшается.*

*2) Для сгущающегося водяного пара  $\alpha = 10\,000$ ; передаче теплоты способствует отсутствие воздуха и быстрое удаление конденсационной воды.*

<sup>1)</sup> См. К. В. Кирш. Котельные установки. Литограф. изд. Москва, 1913 г. Таблица II, стр. 7.

<sup>2)</sup> Hütte. Справочная книга для инженеров, изд. БИИТ — ИНО — ГЭУ — ВСНХ — СССР. Берлин, 1926 г., стр. 409 и 410.

3) Для воды некипящей, в покое,  $\alpha = 500$ ;  $\alpha$  имеет большее или меньшее значение в зависимости от того, будет ли форма поверхности стенки способствовать или задерживать течения, образующиеся внутри жидкости.

Если жидкость приводится в движение посредством перемешивающего прибора, то  $\alpha =$  от 2000 до 4000, смотря по интенсивности перемешивания.

4) Для воздуха в состоянии покоя.

Если  $\Delta$  разница между температурой на поверхности и средней температурой воздуха в помещении, то имеем для плоских вертикальных поверхностей:

$$\alpha = 3,0 + 0,08 \cdot \Delta \quad \text{для } \Delta < 10^\circ,$$

$$\alpha = 2,2 \sqrt[4]{\Delta} \quad \text{» } \Delta > 10^\circ.$$

По этим формулам вычислена таблица:

$\Delta = 0$	5	10	25	50	100	200	300	400
$\alpha = 3,0$	3,4	3,8	4,9	5,9	7,0	8,3	9,1	9,8.

Теплопередача от горизонтальной трубы неподвижному воздуху (вычислена по опытам Вамслера и Гинлейна):

$$\alpha = 1,02 \sqrt[4]{\frac{\Delta}{d}}$$

$d$  — диаметр трубы в метрах».

«5) Теплопередача в трубах.

При интенсивном движении внутри труб имеем, по Нуссельту:

а) Газы и перегретые пары:

$$\alpha = 15,90 \cdot \frac{\lambda_{\text{стенка}}}{d^{0,214}} \cdot \left( \frac{\omega C}{\lambda} \right)^{0,786} \frac{\text{кал.}}{\text{кв. м}^\circ \text{С час.}},$$

где означают:

$\lambda_{\text{стенка}}$  — коэффициент теплопроводности газа при температуре стенки трубы в кал/час. м<sup>°С</sup>;

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности газа при средней температуре внутри трубы в кал/час м<sup>°С</sup>;

$\omega$  — средняя скорость движения в м/сек;

$C$  — удельная теплота 1 куб. м газа при постоянном давлении и состоянии газа внутри трубы;

$d$  — диаметр трубы в метрах.

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)



Уравнение составлено на основании опытов над латунной трубой диаметром 0,022 м с воздухом (от 1 до 16 атм.), углекислотой и светильным газом.

Если ввести вес  $G$  газовой смеси, проходящей через трубу в секунду, то уравнение переходит в:

$$\alpha = 19,23 \cdot \frac{\lambda_{\text{стенка}}}{d^{1,786}} \cdot \left( \frac{G}{\lambda} \cdot C_p \right)^{0,786} \quad 1)$$

β) В о д а.

$$\alpha = (4100 + 50 \cdot t_{\text{ср}}) \cdot \omega^{0,84},$$

$t_{\text{ср}}$  представляет среднее из температуры воды и температуры стенки трубы, и  $\omega$  — среднюю скорость воды в м/сек. Формула составлена на основании опытов Стантона над трубами красной меди (диам. от 7 до 14 мм,  $\omega = 0,8$  до 4,0 м)». <sup>2)</sup>

Для теплопроводности воздуха и водяного пара приводятся следующие формулы: <sup>3)</sup>

$$\lambda_{\text{воздух}} = 0,01894 \cdot (1 + 0,00228 \cdot t) \quad (244)$$

$$\lambda_{\text{вод. пар}} = 0,01405 \cdot (1 + 0,00369 \cdot t) \quad (245)$$

Из рассмотрения таблицы 14, а также добавлений к ней, приведенных на 118—120 стр., мы видим, что условия работы даже чистых стенок на практике весьма различны как по причине их различного взаимного расположения относительно теплоизлучающих поверхностей, так и в зависимости от условий, способствующих лучшему или худшему омыванию стенок как со стороны нагревающего тела, так и со стороны нагреваемого. Учитывая, помимо того, влияние целого ряда иных факторов, а именно: температуры, скоростей и т. п., приходится при расчетах выбирать значения величин коэффициентов теплопередачи на основании экспериментальных данных, считаясь с теми условиями, в которых в будущем будет работать стенка.

Однако необходимо заметить, что с увеличением скорости газов в газоходах увеличивается коэффициент теплопередачи.

<sup>1)</sup> H ü t t e. Изд. БИИТ. Берлин, 1926 г., стр. 410.

<sup>2)</sup> Там же, стр. 411.

<sup>3)</sup> Там же, стр. 413.

Мы полагаем возможным пользоваться для учета зависимости коэффициента теплопередачи от скорости газов следующей формулой:

$$\frac{K'}{K''} = \left(\frac{\omega'}{\omega''}\right)^{0,8} \quad (246)$$

где  $K'$  — коэффициент теплопередачи при скорости газов  $\omega'$ , а  $K''$  — при  $\omega''$

ТАБЛИЦА 15.

$\frac{\omega'}{\omega''}$	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
$\left(\frac{\omega'}{\omega''}\right)^{0,8}$	1	1,079	1,157	1,234	1,309	1,383	1,456	1,529	1,6	1,671	1,741

Например при увеличении скорости в 2 раза коэффициент теплопередачи возрастает на 74,1% (см. табл. 15).

Формула (233) пригодна для подсчета до тех пор, пока преобладающим слагаемым является тепло, передаваемое соприкосновением, но коль скоро лучеиспускание начинает играть сильно преобладающую роль, что имеет обыкновенно место в топках, вести расчет по формуле Редтенбахера уже не представляется возможным, и необходимо отдельно учитывать тепло, передаваемое соприкосновением (формула 231), и тепло, передаваемое лучеиспусканием (формула 232).<sup>1)</sup>

Рассмотрим общий случай расчета передачи тепла соприкосновением через стенку от нагревающего тела переменной температуры к нагреваемому телу тоже переменной температуры.

Пусть первого тела (нагревающего, отдающего тепло) протекает  $G_1$  кг в час; его теплоемкость  $C_1$  и температура вначале и в конце соответственно  $t'_1$  и  $t''_1$ , а второго тела (нагреваемого, получающего тепло) пусть протекает  $G_2$  кг в час, его теплоемкость обозначим через  $C_2$  и температуру вначале и в конце соответственно через  $t'_2$  и  $t''_2$ .

Ради упрощения примем теплоемкости постоянными, не зависящими от температуры, и напишем уравнение (233) для нашего случая в дифференциальной форме:

$$-dQ = K \cdot (t_1 - t_2) \cdot dH, \quad (247)$$

<sup>1)</sup> Лиц, интересующихся более глубоко вопросами теплопередачи в котельных установках, мы отсылаем к работе проф. М. В. Кирпичева «О теплопередаче в котлах», помещенной в книге «Успехи тепловой техники» изданной под редакцией проф. А. А. Радцига в Ленинграде, 1924 г., стр. 111 — 214.

где  $dQ$  есть тепло, отданное нагревающим телом поверхности нагрева на бесконечно малом участке  $se$   $dH$  и равное теплу, воспринятому нагреваемым телом, получающим тепло от поверхности нагрева.

Следовательно

$$dQ = G_1 \cdot C_1 \cdot dt_1 \quad (248)$$

$$-dQ = G_2 \cdot C_2 \cdot dt_2 \quad (249)$$

Знак минус в уравнении (247) указывает на то, что при увеличении поверхности нагрева  $dH$  нагревающее тело охлаждается.

Проинтегрировав уравнения (248) и (249) от начальной точки и до конечной, получим:

$$\int_{t_1'}^{t_1''} dQ = G_1 \cdot C_1 \cdot (t_1'' - t_1'); \quad (250)$$

$$\int_{t_2'}^{t_2''} -dQ = \int_{t_2''}^{t_2'} dQ = G_2 \cdot C_2 \cdot (t_2'' - t_2') \quad (251)$$

При отсутствии потерь и при установившемся состоянии будем иметь:

$$\int_{t_1'}^{t_1''} dQ = \int_{t_2'}^{t_2''} -dQ, \quad (252)$$

или

$$G_1 \cdot C_1 \cdot (t_1'' - t_1') = G_2 \cdot C_2 \cdot (t_2'' - t_2') \quad (253)$$

Интегрируя те же уравнения на участке от начальной точки до произвольной, рассматриваемой в данный момент, получим:

$$G_1 \cdot C_1 \cdot (t_1' - t_1) = G_2 \cdot C_2 \cdot (t_2 - t_2'), \quad (254)$$

откуда

$$t_2 = \frac{G_1 \cdot C_1}{G_2 \cdot C_2} \cdot (t_1' - t_1) + t_2', \quad (254')$$

где  $t_1$  — температура тела, отдающего тепло в рассматриваемом сечении газотока, а  $t_2$  — соответствующая этому сечению температура нагреваемого тела, получающего тепло.

Подставляя  $t_2$  в формулу (247), получим:

$$-dQ = K \cdot \left[ t_1 \left( 1 + \frac{G_1 \cdot C_1}{G_2 \cdot C_2} \right) - \left( \frac{G_1 \cdot C_1}{G_2 \cdot C_2} \cdot t_1' + t_2' \right) \right] \cdot dH. \quad (255)$$

НБ  
УДУНТ  
(ДПТ)

Из формул (248) и (255) имеем:

$$dH = \frac{-G_1 C_1 dt_1}{K \cdot \left[ \left(1 + \frac{G_1 \cdot C_1}{G_2 \cdot C_2}\right) \cdot t_1 - \left(\frac{G_1 \cdot C_1}{G_2 \cdot C_2} \cdot t'_1 + t'_2\right) \right]}; \quad (256)$$

интегрируя от нуля до H или, что то же, от  $t'_1$  до  $t''_1$ , найдем:

$$H = \frac{-G_1 C_1}{K \cdot \left(1 + \frac{G_1 \cdot C_1}{G_2 \cdot C_2}\right)} \times \int_{t'_1}^{t''_1} \frac{d\left[\left(1 + \frac{G_1 \cdot C_1}{G_2 \cdot C_2}\right) \cdot t_1\right]}{\left[\left(1 + \frac{G_1 \cdot C_1}{G_2 \cdot C_2}\right) \cdot t_1 - \left(\frac{G_1 \cdot C_1}{G_2 \cdot C_2} \cdot t'_1 + t'_2\right)\right]}, \quad (257)$$

откуда

$$H = \frac{G_1 C_1}{K \cdot \left(1 + \frac{G_1 \cdot C_1}{G_2 \cdot C_2}\right)} \times \ln \frac{\left(1 + \frac{G_1 \cdot C_1}{G_2 \cdot C_2}\right) \cdot t'_1 - \left(\frac{G_1 \cdot C_1}{G_2 \cdot C_2} \cdot t'_1 + t'_2\right)}{\left(1 + \frac{G_1 \cdot C_1}{G_2 \cdot C_2}\right) \cdot t''_1 - \left(\frac{G_1 \cdot C_1}{G_2 \cdot C_2} \cdot t''_1 + t'_2\right)} \quad (258)$$

Из (253) имеем:

$$\frac{G_1 C_1}{G_2 \cdot C_2} = \frac{t'_2 - t''_2}{t'_1 - t''_1} \quad (253^1)$$

Подставляя найденное отношение в формулу (258), получим окончательно:

$$H = \frac{G_1 C_1 (t'_1 - t''_1)}{K \cdot (t'_1 - t''_1 + t'_2 - t''_2)} \cdot \ln \frac{t'_1 - t'_2}{t''_1 - t''_2} \quad (259)$$

Формула (259) выведена в предположении существования равенства (249), которое указывает на то, что если итти в сторону снижения температуры нагревающего тела (ср. формулу 248), то температура нагреваемого тела возрастает, т.-е. мы имеем случай параллельного тока, когда движение нагреваемого тела, получающего тепло, совершается в том же направлении, что и тела нагревающего, отдающего тепло.

Следовательно формула (259) справедлива лишь при параллельном токе; в случае же противотока она изменится и, как нетрудно доказать, получит вид:

$$H = \frac{G_1 \cdot C_1 \cdot (t'_1 - t''_1)}{K \cdot (t'_1 - t''_1 + t'_2 - t''_2)} \cdot \ln \frac{t'_1 - t''_2}{t''_1 - t'_2} \quad (260)$$

В формулах (259) и (260) числитель дроби множителя перед логарифмом есть не что иное, как все тепло, отданное в час нагревающим телом при его охлаждении с температуры  $t'_1$  до температуры  $t''_1$ .

Если воспринимающее тепло тело сохраняет температуру постоянной (процесс испарения при постоянном давлении), то, полагая в формулах (269) и (270)

$$t'_2 = t''_2 = t_2 = \text{const.} \quad (261)$$

найдем:

$$H = \frac{G_1 \cdot C_1}{K} \cdot \ln \frac{t'_1 - t_2}{t''_1 - t_2} \quad (262)$$

Если постоянной будет температура отдающего тепло тела, что возможно, например, для насыщенных паров при использовании их теплоты парообразования, то числитель множителя перед логарифмом, как и раньше, равен теплу, отданному носителем. В случае насыщения пара он равен произведению  $r_1 G_1$ , где  $r_1$  — теплота парообразования пара — берется по таблицам насыщенного пара для соответствующего носителя тепла в зависимости от величины его давления.

В том случае, когда носителем является газ, температура которого искусственно поддерживается постоянной за счет подвода к нему тепла  $Q$  кал в час, то его можно рассматривать как передатчик тепла, и в числитель множителя перед  $\ln$  должна входить в этом случае величина  $Q$ . Наиболее часто встречающийся случай, это — передача тепла от насыщенного пара в разного рода паровых подогревателях.

Случай  $H = 0$ , при  $G_1 \cdot C_1 \cdot (t'_1 - t''_1) = 0$  отпадает сам собой, ибо в этом случае нет передачи тепла.

Поэтому, когда  $G_1 \cdot C_1 \cdot (t'_1 - t''_1)$  не равно нулю даже при равенстве

$$t'_1 = t''_1 = t_1 = \text{const.}, \quad (263)$$

что обычно и имеет место при использовании скрытой теплоты пара или при подводе тепла  $Q$  кал/час со стороны, то равенства (259) и (260) соответственно получают вид:

$$H = \frac{Q}{K \cdot (t''_2 - t'_2)} \cdot \ln \frac{t_1 - t'_2}{t_1 - t''_1} \quad (264)$$

$$H = \frac{Q}{K \cdot (t'_2 - t''_2)} \cdot \ln \frac{t_1 - t''_2}{t_1 - t'_1} \quad (265)$$

УДНБ  
УДУНТ  
(ДНТ)

Совершенно очевидно, что формулы (264) и (265) дают в этом случае одну и ту же величину  $\Pi$ .

Следовательно для насыщенного пара, в качестве нагревателя, имеем:

$$\Pi = \frac{r_1 \cdot G_1}{k \cdot (t'_2 - t''_2)} \cdot \ln \frac{t_1}{t'_1} \frac{t''_2}{t_2} = \frac{r_1 \cdot G_1}{K \cdot (t''_2 - t'_1)} \cdot \ln \frac{t_1 - t'_2}{t_1 - t''_2} \quad (266)$$

При постоянстве температур нагревающего тела и нагреваемого, т.-е. при наличии равенств (261) и (263), что, например, имеет место в случае испарения жидкости под постоянным давлением за счет конденсации насыщенного пара той же и другой жидкости в испарителях, получим непосредственно из формулы (247):

$$\Pi = \frac{\int_0^{\Pi} -dQ}{K \cdot (t_1 - t_2)} = \frac{r_1 \cdot G_1}{K \cdot (t_1 - t_2)} = \frac{r_2 \cdot G_2}{K \cdot (t_1 - t_2)}, \quad (267)$$

где  $r_2$  и  $G_2$  соответственно — полная теплота парообразования и количество испаряемой жидкости при давлении, соответствующем температуре  $t_2$ .

*Пример 25.* Определить коэффициент теплопередачи для чистой стенки, котла, толщиной 15 мм, если эта стенка расположена в той части газохода, где коэффициент  $\alpha$ , характеризующий переход тепла от газов к стенке может быть принят равным 20 кал/кв. м °С час.

*Решение.* При железной стенке будем иметь по формуле (238):

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{20} + \frac{0,015}{50} + \frac{1}{5000} = 0,05 + 0,0003 + 0,0002 = 0,0505.$$

При медной стенке по той же формуле:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{20} + \frac{0,015}{300} + \frac{1}{5000} = 0,05 + 0,00005 + 0,0002 = 0,05025.$$

В обоих случаях практически можно считать:

$$K = \alpha = 20.$$

*Пример 26.* Выяснить, что сильнее влияет на уменьшение коэффициента теплопередачи, загрязнение стенки маслом, накипью или золой.

*Решение.* На основании формулы (242) утверждаем, что больше всего при одной и той же толщине загрязнения влияет масло, ибо для него коэффи-

НБ  
ДУНТ  
(ДИТ)

циент теплопроводности имеет наименьшую величину, затем зола и, наконец, накипь.<sup>1)</sup>

*Пример 27.* Опытом установлено, что при средней скорости газов в гладкотрубном чугунном экономайзере Грина 4 м/сек. коэффициент теплопередачи от газов к воде при чистой стенке равен около 15 кал/кв. м·°С·час. Определить, каким коэффициентом можно задаться при расчете, если стенка загрязнена слоем накипи 5 мм, масла 0,5 мм и золы 2 мм. Скорость воды обычная, а скорость газов 8 м/сек.

*Решение.* Из формулы (238) имеем:

$$\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_4} = \frac{1}{K} = \frac{1}{15};$$

подставляя эту величину в формулу (242), найдем:

$$\begin{aligned} K'' &= \frac{1}{\frac{1}{15} + \frac{0,002}{0,2} + \left(\frac{0,005}{2} + \frac{0,0005}{0,15}\right)} = \frac{1}{0,06667 + 0,01 + (0,0025 + 0,003334)} = \\ &= \frac{1}{0,0825} = 12,12 \text{ при скорости газов 4 м/сек.} \end{aligned}$$

Окончательно по формуле (246) имеем:

$$K = 12,12 \cdot \left(\frac{8}{4}\right)^{0,8} = 21,1, \text{ при скорости 8 м/сек.}$$

*Пример 28.* Определить поверхность нагрева водоводяного подогревателя, если известно, что расход нагревающей воды составляет 6 т/час при охлаждении ее от 80 до 30° С, а расход подогреваемой воды составляет 20 т/час при нагревании ее на 15°, от 10 до 25° С.

*Решение.* Предположим, что подогреватель выполнен из железа толщиной 3 мм и вода движется в нем с одинаковой скоростью 1 м/сек. На стр. 120 была приведена формула для подсчета теплоотдачи от медной стенки к воде. Пользуясь ею, определим теплопередачу для железной стенки. Так как в нее входит  $t_{\text{ср}}$  — средней арифметической из температур стенки и воды, то зададимся температурой стенки, равной:

$$t_{\text{стенки}} = \left(\frac{80 + 30}{2} + \frac{10 + 25}{2}\right) : 2 = (55 + 17,5) : 2 = 36,25.$$

При  $t_{\text{стенки}} = 36^\circ\text{С}$  получим:

$$\alpha_1 = \left(4100 + 50 \cdot \frac{55 + 36}{2}\right) \cdot 1 = 6375$$

$$\alpha_2 = \left(4100 + 50 \cdot \frac{36 + 17,5}{2}\right) \cdot 1 = 5437,5$$

<sup>1)</sup> Что опаснее для крепости стенки — загрязнение ее сажей и золой или маслом и накипью?

Принимая для железа  $\lambda = 50$ , получим по формуле (242) общий коэффициент теплопередачи от воды к воде:

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{6375} + \frac{0,003}{50} + \frac{1}{5437,5}} = \frac{1}{0,0001569 + 0,00006 + 0,0001839} = 2495. ^1)$$

Для параллельного тока по формуле (259) найдем:

$$H = \frac{6000 \cdot 1 \cdot (80 - 30)}{2495 \cdot (80 - 30 + 25 - 10)} \cdot \ln \frac{80 - 10}{30 - 25} = 4,88 \text{ м}^2.$$

Округляя эту величину до  $5 \text{ м}^2$ , определим по формуле (241) среднюю температуру стенки:

$$\delta_2 = 17,5 + \frac{6000 \cdot 50}{5} (0,00006 + 0,0001839) = 17,5 + 14,6 = 32,1;$$

$$\delta_5^2) = t + \frac{Q}{H} \cdot \frac{1}{\alpha_4} = 17,5 + \frac{6000 \cdot 50}{5} \cdot 0,0001839 = 17,5 + 11 = 18,5.$$

Проверим  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и  $K$ :

$$\alpha_1 = 4100 + 50 \cdot \frac{55 + 32,1}{2} = 6277,5;$$

$$\alpha_2 = 4100 + 50 \cdot \frac{17,5 + 28,1}{2} = 5240;$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{6277,5} + \frac{0,003}{50} + \frac{1}{5240}} = \frac{1}{0,0001593 + 0,0006 + 0,0001909} = \frac{1}{0,0004102} = 2438;$$

$$H = \frac{6000 \cdot 1 \cdot (80 - 30)}{2438 \cdot (80 - 30 + 25 - 10)} \cdot \ln \frac{80 - 10}{30 - 25} = 4,996 = 5 \text{ кв. м.}$$

При противотоке, по формуле (260), получим:

$$H = \frac{6000 \cdot 1 \cdot (80 - 30)}{2438 \cdot (80 - 30 + 10 - 25)} \cdot \ln \frac{80 - 25}{30 - 10} = 3,557.$$

<sup>1)</sup> Интересно сравнить эту цифру со старой формулой в Hütte 1912 г., стр. 325, где давалось для  $\alpha = 300 + 1800 \cdot \sqrt{\omega}$ , что при  $\omega = 1 \text{ м/сек}$  приводит к  $\alpha = 2100$  и

$$K = \frac{1}{\frac{1}{2100} + \frac{0,003}{50} + \frac{\lambda}{2100}} = 987,8.$$

Подсчет  $K$  по таблице 14 дает еще более низкие величины.

<sup>2)</sup> Это отношение получим, если сложим два последние равенства в формуле (235) и положим  $\alpha_3 = 0$  и  $\delta_3 = 0$  (чистая стенка).



В этом случае температура стенки будет больше, а именно:

$$\delta_3 = 17,5 + \frac{6000 \cdot 50}{3,5} \cdot (0,00006 + 0,0001909) = 17,5 + 21,5 = 39;$$

$$\delta_5 = 17,5 + \frac{6000 \cdot 50}{3,5} \cdot 0,1909 = 33,8,$$

следовательно возрастут  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и  $K$ :

$$\alpha_1 = 4100 + 50 \cdot \frac{55 + 39}{2} = 6450;$$

$$\alpha_2 = 4100 + 50 \cdot \frac{17,5 + 33,8}{2} = 5382,5;$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{6450} + \frac{0,003}{50} + \frac{1}{5382,5}} =$$

$$= \frac{1}{0,000155 + 0,00006 + 0,0001858} = 2495;$$

$$H = \frac{6000 \cdot (80 - 30)}{2495 \cdot (80 - 30 + 10 - 25)} \ln \frac{80 - 25}{30 - 10} = 3,48 \text{ кв. м.}$$

*Ответ:* при параллельном токе 5 кв. м;  
при противотоке около 3,5 кв. м.

## ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ВТОРАЯ.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТОПКЕ.

При определении температуры в топке необходимо прежде всего считаться с теплоизлучением раскаленного слоя топлива и его факела на поверхность нагрева, воспринимающую тепло.

Назовем, по примеру проф. К. В. Кирш, прямой отдачей все тепло, переданное лучеиспусканием в топке. Тогда температура продуктов сгорания в топке, или, короче, температура топки  $T_{т.}$ , определится по следующей формуле:

$$T_{т.} = 0,01 \cdot \eta_{т.} \cdot (1 - \sigma) \cdot T_{г.}, \quad (268)$$

где  $\sigma$  — коэффициент, учитывающий снижение температуры продуктов сгорания за счет прямой отдачи топки;

$\eta_{т.}$  — коэффициент полезного действия топки (в процентах), учитывающий потерю топки в окружающую среду, а также потерю от механической и химической неполноты сгорания.

УДУНТ  
(ДИТ)

Прямая отдача зависит:

- 1) от расположения зеркала горения относительно поверхности нагрева котла (взаимное сочетание топки с котлом);
- 2) от характера топлива и его пламени (химический состав топлива, выход летучих, их качество и количество);
- 3) от величины зеркала излучения и поверхности, воспринимающей тепло путем лучепоглощения;
- 4) от напряжения квадратного метра зеркала горения, и
- 5) от многих других факторов.

Совершенно очевидно, что величина прямой отдачи будет тем больше, чем выше теоретическая температура горения топлива и чем удачнее расположено зеркало горения по отношению к воспринимающей тепло поверхности нагрева.

Последний фактор — взаимное расположение поверхностей, излучающих и воспринимающих тепло — играет доминирующее значение.

Фиг. 10 наглядно иллюстрирует влияние различных условий взаимного расположения топки и котла на величину коэффициента прямой отдачи (см. стр. 131).

К сожалению, нельзя дать вполне надежных формул и цифр для характеристики абсолютной величины прямой отдачи.

Чтобы до некоторой степени иметь представление о влиянии на величину коэффициента прямой отдачи различных условий, с которыми приходится встречаться на практике, приведем величины этих коэффициентов для наиболее характерных случаев.

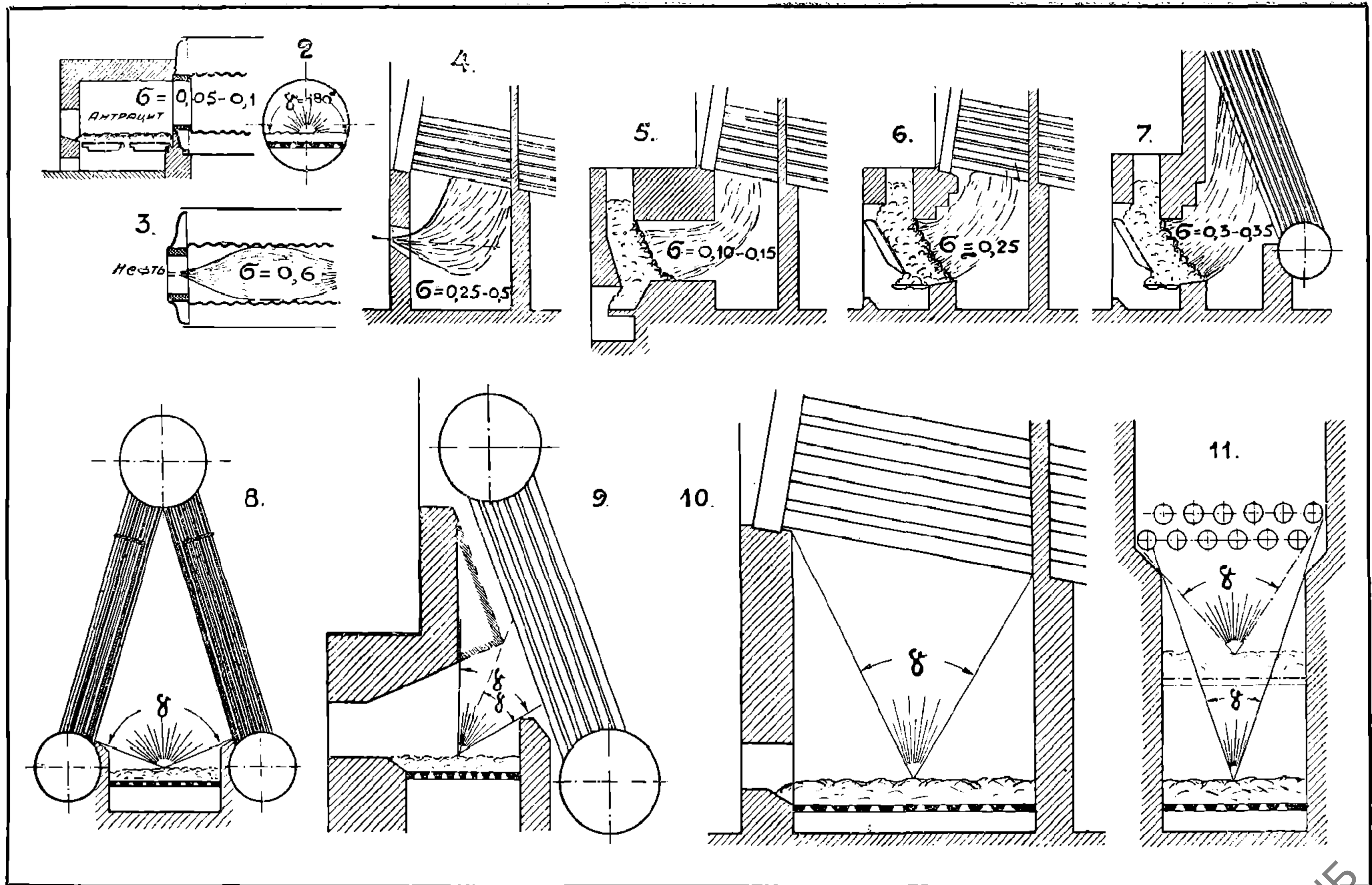
ТАБЛИЦА 16.

Для дров и торфа.	
Шахтные топки к жаротрубным котлам (комбинация, терпимая по необходимости). Коэфф. избытка воздуха в топке принят = 1,2 — 1,3	$\sigma = 0,10 — 0,15.$
Шахтные топки с наклонным зеркалом горения, правильно расположенные под горизонтально-водотрубными котлами (см. фиг. 10, эскиз 6). При напряжении зеркала горения около одного миллиона калорий с кв. метра в час при коэфф. избытка воздуха в топке = 1,2 — 1,3	$\sigma = \text{ок. } 0,25.$
Шахтные топки с наклонным зеркалом горения, комбинируемые с вертикально-водотрубными котлами (типа Гарбе) (см. фиг. 10, эскиз 7) (весьма удачное сочетание). При напряжении зеркала горения около одного миллиона калорий с кв. метра в час и при коэфф. избытка воздуха в топке около 1,25	$\sigma = 0,30 — 0,35.$

Продолжение.

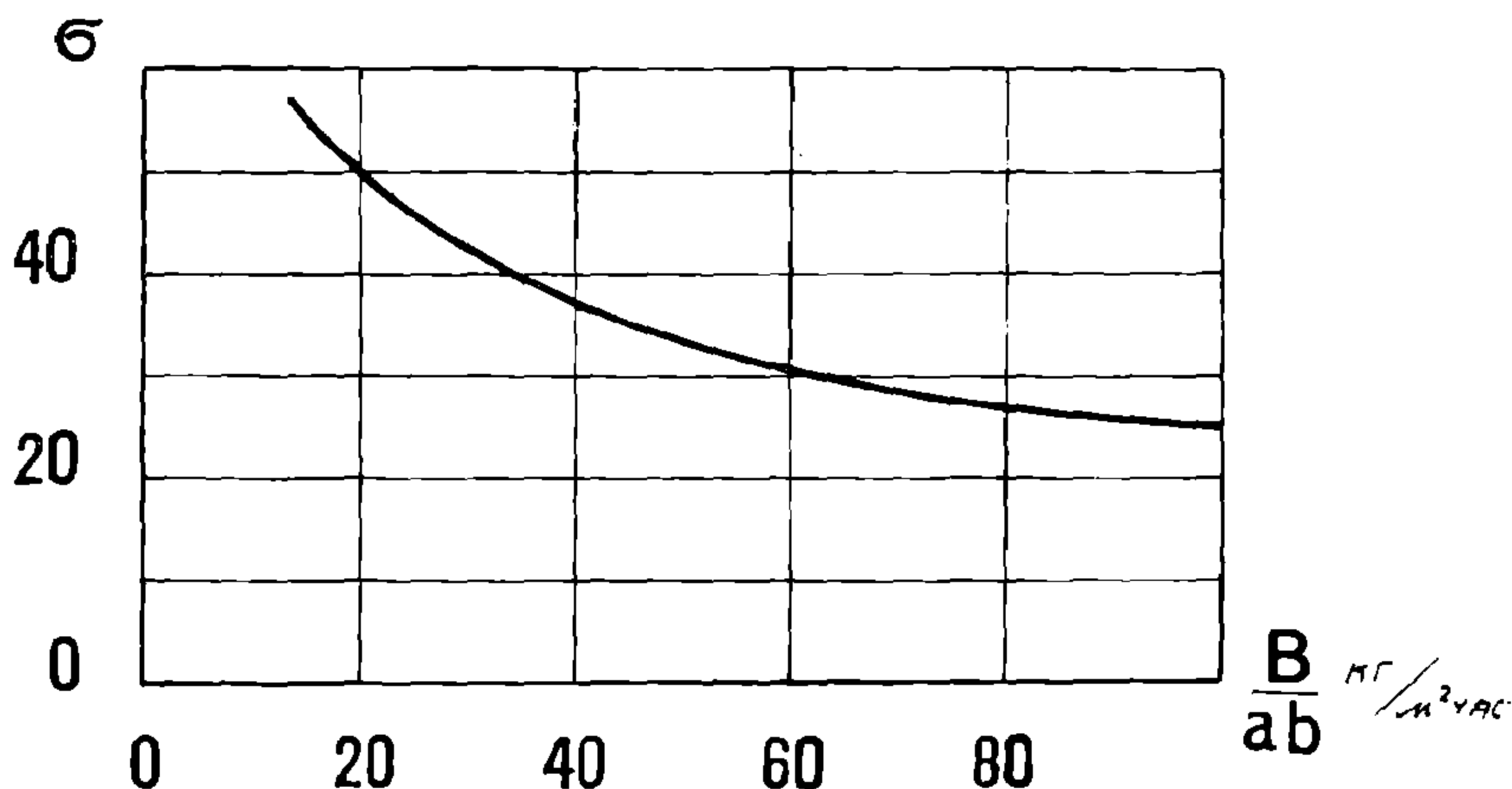
<p>Для дров и торфа.</p> <p>Шахтные топки с большим (развитым) соединительным горлом. Неизбежная комбинация при жаротрубных котлах и совершенно излишняя при горизонтально-водотрубных (см. фиг. 10, эскиз 5)</p>	$\sigma = 0,10 - 0,15.$
<p>Шахтные топки с вертикальным зеркалом горения, употребляемые исключительно для дров, особенно сырых и длинных</p>	$\sigma = 0,20.$
<p>Для антрацита.</p> <p>Выносная топка к жаротрубному котлу (см. фиг. 10, эскиз 1) (комбинация нерациональная)</p>	$\sigma = 0,05 - 0,10.$
<p>Колосниковая топка внутри жаровой трубы (см. фиг. 10, эскиз 2) при коэфф. избытка воздуха <math>\alpha_m = 1,3</math></p> <p>Примечание. <math>\sigma</math> учитывает все теплоглощение первых трех метров длины жаровой трубы. Под <math>B</math> подразумевается часовой расход 7000-калорного топлива в кг, а под <math>R</math> площадь колосниковой решетки в квадратных метрах (точнее площадь зеркала горения).</p>	$\sigma = 0,5 - 0,0006 \cdot \frac{B}{R}.$
<p>Колосниковая решетка под горизонтально-водотрубным котлом. Коэфф. избытка воздуха в топке <math>\alpha_m = 1,3</math>, а высота топочного пространства равна 1500 мм (см. фиг. 10, эскизы 10 и 11).</p> <p>При ширине топочного пространства меньше 1500 мм (узкие котлы)</p>	$\sigma = 0,38 - 0,0006 \cdot \frac{B}{R}.$
<p>При ширине топочного пространства больше 1500 мм (широкие котлы)</p> <p>Примечание. В тех случаях, когда теплопроизводительность топлива <math>Q_{\text{раб.}}</math> не равна 7000 кал/кг, следует вставлять вместо <math>B</math> величину <math>B \cdot \frac{Q_{\text{раб.}}}{7000}.</math></p>	$\sigma = 0,40 - 0,0006 \cdot \frac{B}{R}.$
<p>Для мазута (нефтяные остатки).</p> <p>При сжигании нефти в жаровых трубах (см. фиг. 10, эскиз 3) с избытком воздуха 20% против теоретически необходимого и при паровом распыливании все теплоглощение на первых трех метрах длины жаровой трубы учитывается коэффициентом</p> <p>где <math>B</math> — часовой расход нефти в кг, а <math>d</math> — диаметр жаровой трубы в метрах.</p>	$\sigma = 0,55 - 0,001 \cdot \frac{B}{d}.$

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)



Фиг. 10. Зависимость коэффициента прямой отдачи топки от рода топлива и от взаимного расположения топки и котла.

При сжигании нефти путем парового распыливания под горизонтально-водотрубным котлом (см. фиг. 10, эскиз 4) коэффициент  $\sigma$  зависит в сильной степени от отношения количества сожженного за час топлива ( $B_{кз}$ ) к произведению из ширины ( $a$ ) топки на длину ( $b$ ) трубок в первом ряду (или приблизительно на длину топки). Эта зависимость дана на фиг. 11. <sup>1)</sup>



Фиг. 11. Зависимость прямой отдачи от напряжения в нефтяной топке.

Величина коэффициента полезного действия топки  $\eta_{т.}$ , входящего в формулу (268), для определения температуры топки  $T_{т.}$ , определяется путем оценки потерь от химической и механической неполноты горения топлива  $q_3$  и  $q_4$  (см. гл. IX и XI) и потери в окружающую среду топкой  $q_5^T$  (см. таблицу 12 на стр. 74) по нижеследующей формуле:

$$\eta_{т.} = 100 - (q_3 + q_4 + q_5^T). \quad (269)$$

Заканчивая на этом вопрос о вычислении температуры топки, я считаю нужным указать, что в руках конструктора топок имеется богатое средство для регулирования температуры в топке. В тех случаях, когда приходится сжигать очень низкосортное и влажное топливо, возможно постановкой специальных сводиков уменьшить величину прямой отдачи и тем достигнуть необходимой для устойчивого горения топлива температуры в топке, которая не должна быть ниже  $850^{\circ}\text{C}$ . Желательно иметь ее в пределах  $900 - 1200^{\circ}\text{C}$ . Это один путь, который дает нам возмож-

<sup>1)</sup> См. К. В. Кирш. «Котельные установки» 1913 г., стр. 10.

ность сжигать малотеплоценное горючее, но он уменьшает работу первого хода котла за счет уменьшения передачи тепла путем лучеиспускания зеркалом горения непосредственно на поверхность нагрева.

Увлекаться сводиками особенно не рекомендуется, так как при неудачном расположении сводов иногда можно создать весьма невыгодные условия для работы самого котла, что нередко приходится наблюдать на практике при вертикально-водотрубных котлах, последствием чего бывает преждевременное перегорание трубок и тому подобные неприятности в работе.

В качестве такого мало удачного расположения свода в топке можно указать хотя бы на фиг. 1 (см. стр. 8), дающую нам схему котельной установки, где, как нетрудно видеть, созданы весьма тяжелые условия для работы первых рядов труб в их нижней части, подверженной ударному действию пламени.

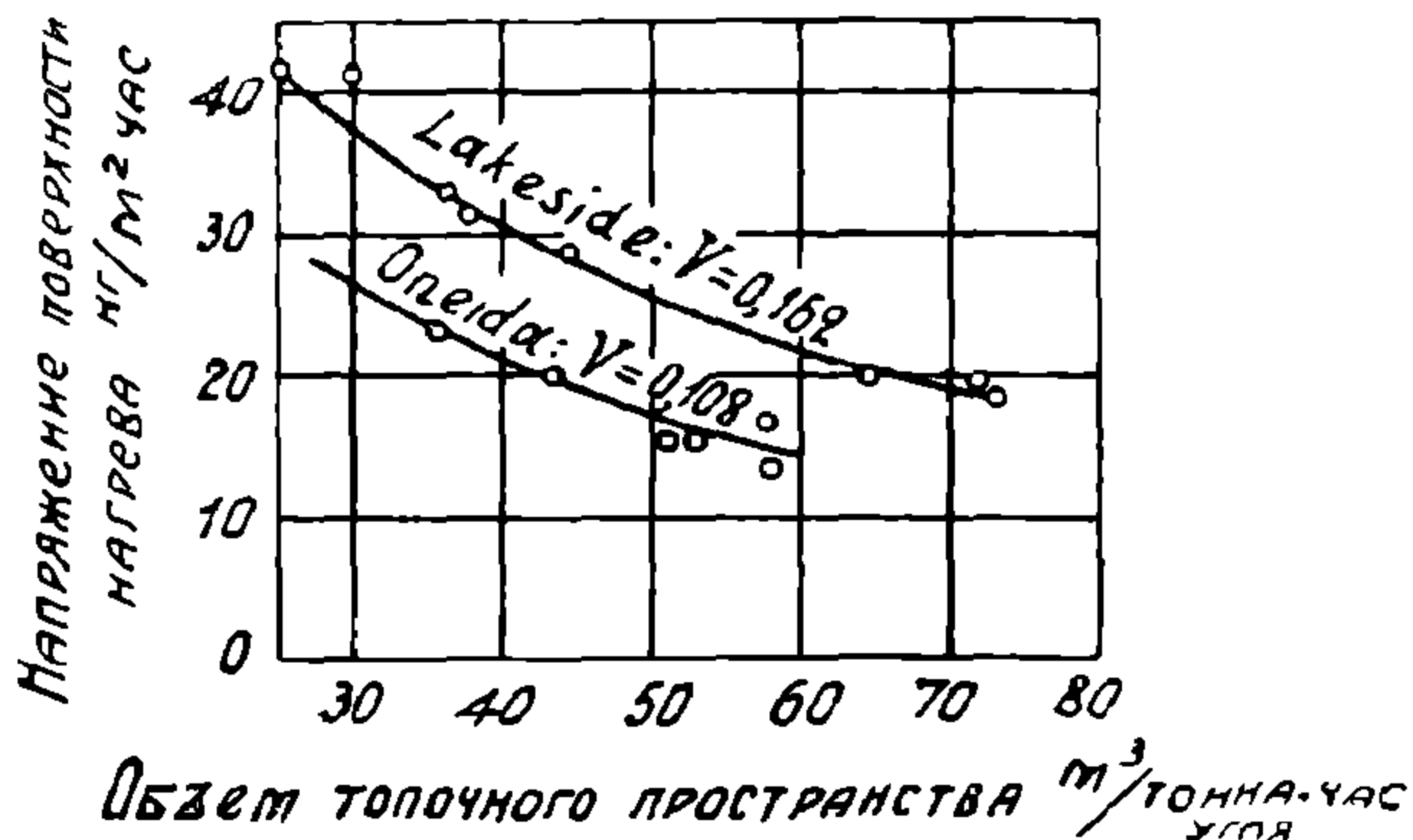
Другой путь поднять температуру топки (см. формулу 268), это—повысить теоретическую температуру горения  $T_r$ , что тоже до некоторой степени во власти конструктора, ибо теоретическая температура горения (см. формулу 229 и главу XX) зависит от коэффициента избытка воздуха  $\alpha_t$ , уменьшить который путем надлежащей конструкции топки—есть одна из первых задач конструктора; кроме того температура горения зависит и от температуры воздуха ( $t_v$ ), которую можно повысить путем предварительного нагрева за счет тепла, теряемого в тепловых установках с уходящими газами, в окружающую среду и прочее, что также будет содействовать увеличению температуры  $T_r$ , а следовательно, и  $T_t$ .

Этот путь поднятия температуры топки крайне желателен, так как он позволяет нам не уменьшать в дальнейшем прямой отдачи, весьма полезной для форсированной работы первого хода.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Насколько велик здесь простор конструктору, мы видим на многочисленных примерах последнего времени. Стоит хотя бы вспомнить доклад профессора И. В. Арбатского об изобретенном им способе сжигания топлива на цепных решетках, сделанный им в заседании Политехнического о-ва 28/VII 1922 г. и повторенный на I Всероссийском теплотехническом съезде в январе 1923 года. Автор двояким путем решает поставленную себе задачу. Он уменьшает прежде всего объем продуктов сгорания, удаляя из них водяные пары, а затем подогревает воздух за счет той части топочных газов, которая содержит малое количество  $CO_2$  и тем содействует повышению  $T_r$ .

Как всегда в жизни, здесь технику приходится выбирать то, что для него в данном случае важнее. Чем больше прямая отдача, тем меньше температура в топке, тем дольше держит кладка и тем меньше ремонт, но чрезмерное увлечение прямой отдачей приводит к недопустимому понижению температуры в топке, что может повлечь за собой нередко не только неполноту сгорания, но и заглужание топки.

Не надо также забывать при конструировании топок о том большом влиянии на процесс сгорания топлива, которое имеет в этом отношении достаточный объем топочного пространства. Дать вполне определенные указания в этом отношении пока что затруднительно, так как имеющийся в нашем распоряжении материал не может быть признан для этой цели достаточным.



Фиг. 12. Влияние объема камеры сгорания на величину паронапряжения котла.

Влияние камеры сгорания на величину паронапряжения котла хорошо видно из фиг. 12,<sup>1)</sup> где по оси абсцисс отложен объем топочного пространства, приходящийся на одну тонну сжигаемого в час угля, а по оси ординат — напряжение поверхности нагрева.

Нижняя кривая относится к случаю, когда камера сгорания имела объем 0,108 куб. м (центральная силовая установка Oneida, Мильвоки); верхняя кривая — к случаю, когда камера сгорания имела объем 0,162 куб. м (центральная силовая установка Lakeside, Мильвоки). В последнем случае объем камеры сгорания

<sup>1)</sup> Инж. Г. Блейбтрей (Hermann Bleibtrey). Топочные устройства для сжигания порошкообразного угля. Перевод с немецкого инж.-мех. Н. А. Доллежалъ под редакцией и с предисловием проф. А. А. Надежина. Москва, 1926 г., черт. 60, стр. 139.

УДУНТ  
(ДИТ)

на 50% больше, что дало возможность иметь большие напряжения поверхности нагрева котла при одинаковом угле и одинаковом теплонапряжении топочного пространства.

Русская практика в прошлом держалась часто очень малых топочных пространств, что бывало нередко причиной большой неполноты сгорания топлива, но не следует увлекаться также и чрезмерно большими размерами топочного пространства. Необходимо отметить, что более существенное значение для дожигания горючих, чем объем топочного пространства, имеет длина факела, или путь, который должны совершить газы в топочном пространстве, прежде чем они начнут отдавать тепло соприкосновением поверхности нагрева.

С целью получить лучшее дожигание горючих проф. В. Е. Грум-Гржимайло настойчиво рекомендует устраивать так называемый «мешок горячих газов», который безусловно имеет большее значение.

Для ориентировки в выборе размеров топочного пространства можно руководствоваться данными таблицы 17 (см. стр. 136), где:

$\frac{B}{R}$  — напряжение зеркала горения в килограммах на квадратный метр в час;

$\frac{V}{0,001 \cdot B}$  — объем топочного пространства в куб. метрах на одну тонну топлива, сжигаемого в час;

$\frac{Q_{\text{раб.}}}{1000} \cdot \frac{B}{V}$  — теплонапряжение одного куб. метра топочного пространства в тоннакалориях в час.

*Пример 29.* Определить температуру в топке подмосковного угля с содержанием углерода 38,33%, водорода 3,13%, кислорода 7,06%, азота 0,65%, серы 3,58%, золы 15,75% и влаги 31,5%, если сгорание его происходит в топке под вертикальным водотрубным котлом при избытке воздуха 30%, но с потерями от химической неполноты сгорания 1,5%, от механической неполноты сгорания 3,5% и в окружающую среду толпой 3%. Воздух поступает в зольник подогретым до 200°C. Топка перекрыта сводами так, что коэффициент прямой отдачи не более 0,20.

*Решение.* По формуле (165) и (166):

$$Q_4 = \frac{3,5}{100} \cdot 3595 = 125,8;$$

$$C_{\text{шл.}} + C_{\text{пр.}} + C_{\text{у.}} = \frac{125,8}{81} = 1,55\%.$$

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)



ТАБЛИЦА 17.

Род топлива и способ и его сжигания	$\frac{B}{R}$	$\frac{V}{0,001 \cdot B}$	$\frac{Q_{\text{раб.}} B}{1000 \cdot V}$
	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч.}}$	$\frac{\text{м}^3}{\text{Г} \cdot \text{ч.}}$	$\frac{\text{тккал}}{\text{м}^3 \cdot \text{ч.}}$
Каменный уголь хорошего качества . . . . .	90—120	22—17	320—410
Антрацит кусковой при дутьевой колосниковой топке:			
в жаровой трубе . . . . .	130—140	—	—
под горизонтально-водотрубным котлом с вертикальным отводом газов . . . . .	140—150	13—12	540—580
очень высокое топочное пространство и благоприятные условия для горения . . . . .	160—180	16—14	430—500
для паровоза (чистка топки через 4—6 часов) . . . . .	500—600	4—3	1700—2300
Примечание. Антрацит-мелочь сжигается с напряжением процентов на 20 ниже, чем кусковой антрацит.			
Подмосковный курный уголь на простой колосниковой решетке с опрокидной частью для чистки шлаков и с дутьем:			
кусковой . . . . .	250—300	11—9	270—330
мелкий . . . . .	200	14—13	190—210
на двухскатной топке . . . . .	200	13—11	200—250
на цепной топке (длина $\triangleright$ 4 м, ширина $\triangleright$ 2 м) . . . . .	300—500	9—6	330—500
Торф на простой решетке . . . . .	300—400	9—7	330—430
Торф в шахтной топке . . . . .	300—500	9—6	330—530
Дрова, $W \triangleright 35\%$ на колосниковой решетке . . . . .	350—400	8—7	310—360
Дрова, $W \triangleright 45\%$ , горизонтальная шахта в жаровой трубе (отнесено к полному сечению жаровой трубы) . . . . .	800	—	—
Дрова, $W \triangleright 45\%$ , шахта с наклонным зеркалом . . . . .	500	6	350—420
Дрова, $W$ до 55% и выше. Шахта с вертикальным зеркалом . . . . .	1000	3	450—600
Мазут . . . . .	—	40—20	250—500
Пылевидное топливо . . . . .	—	50—30	120—220

НЕ  
УДУНТ  
(ДИТ)

Следовательно, в процессе сгорания принимал участие не весь углерод топлива  $38,33\%$ , а только часть его  $C_1 = 38,33 - 1,55 = 36,78\%$ , каковое количество в дальнейшем и принимается во внимание.

Решая систему уравнений (131), находим:

$$CO_2 = 13,13\%; CO = 0,35\%; SO_2 = 0,49\%; O_2 = 5,11\% \text{ и } N_2 = 80,92\%.$$

Далее, по формулам (92) и (133):

$$G_{вн.} = 0,6921 \text{ и } V_{сг.} = 5,09;$$

по формуле (203)  $Q_{т.} = 3989;$

(229)  $T_{г.} = 1778.$

Наконец, по формулам (269) и (268) имеем:

$$\eta_{т.} = 100 - (1,5 + 3,5 + 3) = 92\%;$$

$$T_{т.} = 0,01 \cdot 92 \cdot (1 - 0,2) \cdot 1651 = 1309^\circ \text{ C.}$$

## ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ТРЕТЬЯ.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА ПЕРВОГО ХОДА.

При передаче тепла от продуктов сгорания, протекающих по газоходам котла, к воде, кипящей в котле, можно считать температуру воды в котле  $t_{н.}^\circ$  постоянной, зависимой лишь от давления пара в котле; температура же газов будет изменяться от температуры в топке  $T_{т.}$  (см. главу XXII), при которой газы вступают в первый ход, до температуры  $T'_{пе.}$ , при которой они покидают первый ход.

Следовательно в этом случае для расчета можно воспользоваться формулой (262); подставляя в нее соответственные величины для первого хода, получим:

$$H_1 = \frac{(G_{пс.} \cdot C_{пс.})_{т.} \cdot B}{K} \cdot \ln \frac{T_{т.} - t_{н.}}{T'_{пе.} - t_{н.}} \quad (270)$$

НБ  
УДУНТ  
(ДПТ)

Эту же формулу получим, если выразим уравнение (233) в дифференциальной форме:

$$-dQ = K \cdot (T - t) \cdot dH, \quad (271)$$

подставим в него

$$dQ = (G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})_{\text{т.}} \cdot V \cdot dT \quad (272)$$

и затем проинтегрируем в пределах от нуля до  $H$ , или, что то же, в пределах температур газа от  $T_{\text{т.}}$  до  $T'_{\text{пе.}}$ , считая отношение:

$$\frac{(G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})_{\text{т.}} \cdot V}{K} = \text{постоянным} \quad (273)$$

При пользовании формулой (270) надо помнить, что последнее условие (273) не выполняется на практике, ибо числитель отношения и знаменатель его не являются постоянными, но различным образом зависят от целого ряда факторов, чего не должно упускать из виду при пользовании формулой (270). Поэтому при расчете все допущения, принятые при интегрировании, исправляются надлежащим выбором величины коэффициента теплопередачи  $K$ , определяемого опытом в аналогичных условиях работы газохода.

Кроме того, удельная теплота, приходящаяся на 1 кг сожженного топлива и выражаемая произведением  $(G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})_{\text{т.}}$ , вычисляется по составу газов в топке<sup>1)</sup> при помощи формул (228), (133) и (92).

Подсчитывая средние теплоемкости сухих газов и водяных паров по формулам (184) и (185), в данном случае вместо  $T$  подставляют  $(T_{\text{т.}} + T'_{\text{пе.}})$ , где  $T_{\text{т.}}$  — температура в топке, ранее нами определенная, а  $T'_{\text{пе.}}$  — желательная температура газов перед пароперегревателем.

Величина коэфф. теплопередачи первого хода может быть оценена на основании работ проф. К. В. Кирша и лаборатории паровых котлов МВТУ, и мы полагаем возможным придерживаться для нее цифровых значений, приведенных в табл. 18.

<sup>1)</sup> Условный счет, упрощающий накопление опытного материала; при подсчете объемов по среднему составу газов в данном газоходе необходимо иметь не менее двух анализов их в начале и в конце газохода. В конечном же итоге, с точки зрения практики, безразлично, как считать, ибо ошибка в подсчете покрывается соответственно полученной при испытании величиной коэффициента теплопередачи.

ТАБЛИЦА 18.

Коэффициент теплопередачи первого хода в паровых котлах	$\frac{\text{Кал}}{\text{кв. м } ^\circ\text{C час}}$
<p>И. Для жаровых труб.</p>	
<p>При сжигании в них антрацитов («беспламенное топливо» — малое содержание углеводородов)</p>	<p>10—12</p>
<p>То же, но при условии установки в жаровых трубах продольной вертикальной шамотной стенки, толщиной в <math>\frac{1}{2}</math> кирпича.</p>	<p>16—20</p>
<p>При сжигании в жаровых трубах пламенных топлив (большой выход горючих летучих — пламенный каменный уголь, березовые дрова и особенно нефтяное топливо).</p>	<p>20—50</p>
<p>То же, но при наличии в жаровой трубе продольной лучеиспускающей шамотной стенки.</p>	<p>25—60</p>
<p><b>Примечание.</b> Коэффициент теплопередачи в жаровой трубе сильно зависит от ее нагрузки, относительных размеров — диаметра, длины и многих других причин, чем и объясняются столь широкие пределы для <math>K</math>, особенно для пламенных топлив.</p>	
<p>Если обозначить:                  через <math>B</math> — часовой расход топлива в кг;                  » <math>d</math> — средний диаметр жаровой трубы в метрах;  <math>l</math> — полную длину жаровой трубы в метрах,</p>	
<p>то коэффициент теплопередачи в жаровой трубе при сжигании в ней нефтяного топлива путем пудверизации с коэффициентом избытка воздуха в топке <math>\alpha_T = 1,2 - 1,3</math> можно выразить формулой</p>	$K_1 = 6 + 0,55 \cdot \frac{B}{d^2 \cdot (l-3)}$
<p>При сжигании в жаровой трубе пламенного твердого горючего теплопроизводительностью <math>Q_{\text{раб.}} \frac{\text{кал}}{\text{кг}}</math> и коэффициенте избытка воздуха в топке <math>\alpha_T = 1,3 - 1,4</math> можно приближенно считать</p>	$K_1 = 6 + \frac{55}{10^6} \cdot \frac{B \cdot Q_{\text{раб.}}}{d^2 \cdot (l-3)}$
<p>При наличии в жаровой трубе лучеиспускающей шамотной стенки вычисленные по двум последним формулам значения коэффициента теплопередачи первого хода следует увеличить, в зависимости от отношения <math>\frac{B}{d^2}</math>, на.</p>	<p>20—30%</p>
<p>Чем больше отношение <math>\frac{B}{d^2}</math>, тем большее увеличение можно сделать для <math>K_1</math>.</p>	

НБ  
УДАНТ  
(ДИТ)

Продолжение.

Коэффициент теплопередачи первого хода в паровых котлах	$\frac{\text{Кал}}{\text{кв. м } ^\circ\text{C час}}$
<p>II. Для горизонтально-водотрубных котлов.</p> <p>При вертикальном ходе газов . . . . . 25—35</p> <p>Приблизительно можно считать в этом случае коэфф. теплопередачи первого хода численно равным напряжению квадр. метра котла, т.-е. около <math>\frac{D}{H_k}</math></p> <p>При горизонтальном газоходе коэфф. теплопередачи первого хода можно увеличить на 15—20% (сказывается влияние лучеиспускания перегородки, идущей при горизонтальных газоходах параллельно трубкам).</p>	
<p>III. Для вертикально-водотрубных котлов.</p> <p>При 4—5 рядах труб в первом ходе . . . . . 35—40</p> <p>При 8—10 рядах труб в первом ходе . . . . . 25—30</p>	

Проф. К. В. Кирш указал на зависимость коэффициента теплопередачи первого хода в вертикально-водотрубных котлах от средней температуры газов и выразил ее следующим графиком <sup>1)</sup> (см. фиг. 13).

Формула (270) дает нам зависимость величины поверхности нагрева первого хода ( $H$  кв. м) от количества сожженного топлива в час ( $B$  кг) и от температуры насыщенного пара в котле ( $t_n$ , °C).

Температура насыщенного пара определяется по таблицам или диаграммам для водяного пара (см. приложение в конце книги) на основании заданного давления, а часовой расход топлива ( $B$ ) мы находим из соотношения: <sup>2)</sup>

$$(Q_1 + Q_1^{в.}) \cdot B = D_{пе.} \cdot i_{пе.} + D_x \cdot i_x + D_c \cdot i_c + W_{п.} \cdot t'_3 - (D_{пе.} + D_x + D_c + W_{п.}) \cdot t'_3 + L \cdot C \cdot (t_{ii} - t_i), \quad (274)$$

<sup>1)</sup> См. К. В. Кирш. «Котельные установки.» Литограф. изд. 1913 г. Стр. 13.

<sup>2)</sup> См. главы XV, XVI, XVII.

УДМУНТ  
(ДИТ)

откуда

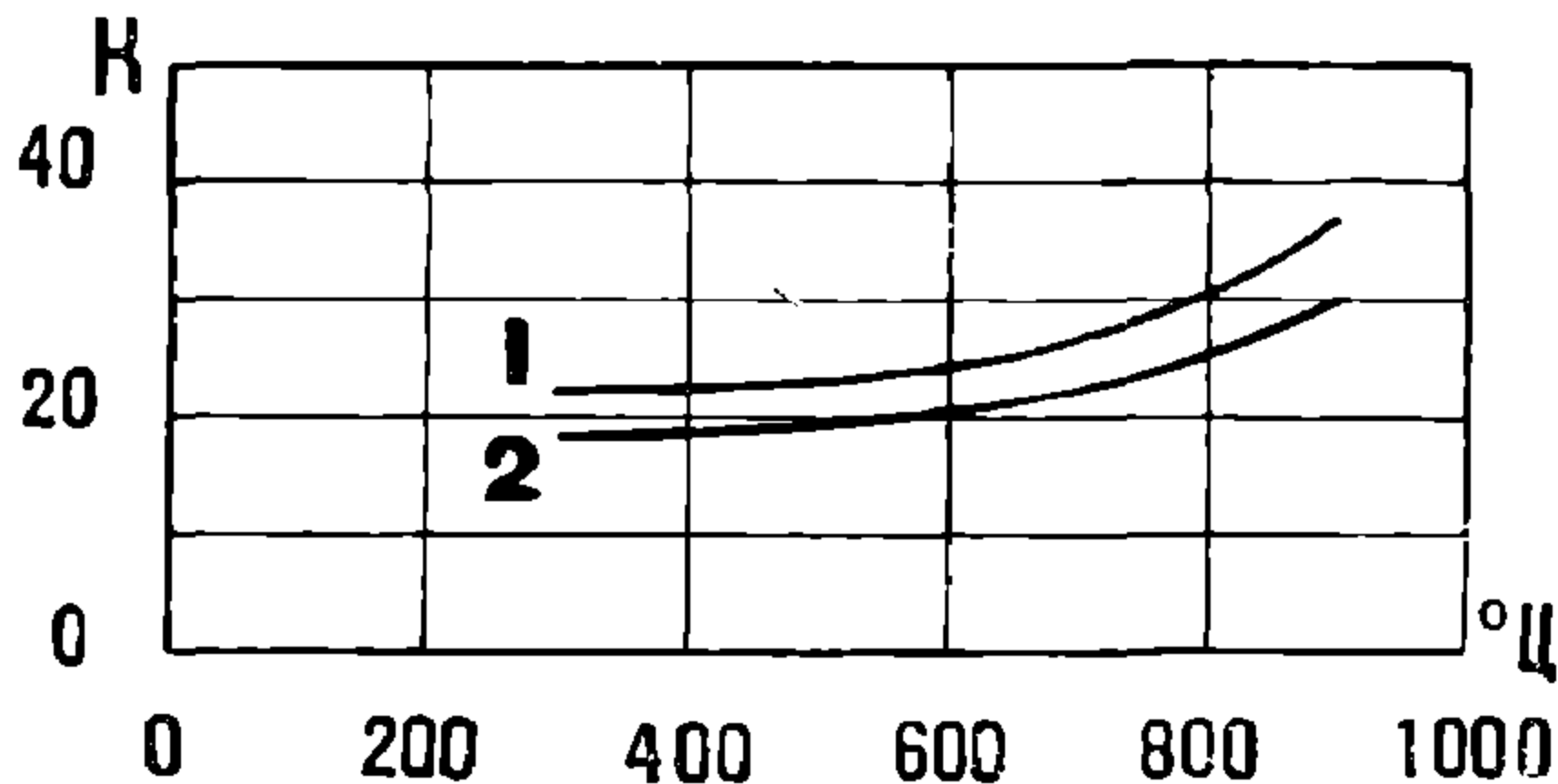
$$B = \frac{D_{\text{пе.}} \cdot i_{\text{пе.}} + D_x \cdot i_x + D_{\text{с.}} \cdot i_{\text{с.}} + W_{\text{п.}} \cdot t''_{\text{э.}} - W_{\text{о.}} \cdot t'_{\text{э.}} + L \cdot C \cdot (t_{\text{н.}} - t_{\text{г.}})}{Q_1 + Q_1^{\text{в.}}}, \quad (275)$$

или:  $[Q_1 + (Q_1^{\text{в.}})_{\text{п.}}] \cdot B = D_{\text{пе.}} \cdot i_{\text{пе.}} + D_x \cdot i_x + D_{\text{с.}} \cdot i_{\text{с.}} + W_{\text{п.}} \cdot t''_{\text{э.}} - W_{\text{о.}} \cdot t'_{\text{э.}} + L_{\text{п.}} \cdot C \cdot (t_{\text{н.}} - t_{\text{г.}}), \quad (274')$

откуда

$$B = \frac{D_{\text{пе.}} \cdot i_{\text{пе.}} + D_x \cdot i_x + D_{\text{с.}} \cdot i_{\text{с.}} + W_{\text{п.}} \cdot t''_{\text{э.}} - W_{\text{о.}} \cdot t'_{\text{э.}} + L_{\text{п.}} \cdot C \cdot (t_{\text{н.}} - t_{\text{г.}})}{Q_1 + (Q_1^{\text{в.}})_{\text{п.}}}. \quad (275')$$

Формула (270) не учитывает потери тепла в окружающую среду кладкой первого хода [при выводе формулы (270) она молчаливо принималась равной нулю].



Фиг. 13. Зависимость коэффициента теплопередачи в вертикальных котлах от средней температуры газов.

Желающие внести соответствующую поправку легко могут это сделать, подставляя в формулу (270) вместо произведения  $(G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})_{\text{т.}}$  величину  $(G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})_{\text{т.}} \left(1 - \frac{Q'_z}{Q_{\text{раб.}}}\right)$ , где  $Q'_z$  есть потеря тепла кладкой первого хода, отнесенная к 1 кг топлива.

Когда из конструктивных соображений  $H_1$  известно, то формула (270) служит для определения  $T'_{\text{пе.}}$  — температуры газов перед пароперегревателем.

Чтобы не решать в этом случае сложного выражения относительно  $T'_{\text{пе.}}$ , рекомендуется оценивать теплоемкость задаваясь  $T'_{\text{пе.}}$ , а затем, определив последнюю по формуле (270), проверить теплоемкости и, если потребуется, сделать повторный подсчет.

Когда искомой является величина поверхности нагрева первого хода  $H_1$ , то она подсчитывается руководствуясь теми соображениями, чтобы располагаемый непосредственно за ней паро-

перегреватель получал продукты сгорания при наивыгоднейшей температуре их.

Чем выше температура газов, вступающих в газоходы пароперегревателя, тем меньше требуется поверхность нагрева для перегрева пара до заданной температуры,<sup>1)</sup> и тем, следовательно, дешевле будет его стоимость; но при температурах выше известных пределов наступают условия, способствующие более быстрому износу пароперегревателей, а следовательно, увеличиваются расходы по его ремонту, и тем самым усложняется эксплуатация котельной и удорожается стоимость пара.

Практика учит нас, что наиболее выгодные условия для работы пароперегревателя мы имеем при температуре продуктов сгорания перед пароперегревателем ( $T'_{пс.}$ ) не выше  $750^{\circ}\text{C}$ , но и не ниже  $600^{\circ}\text{C}$ , так как при дальнейшем понижении температуры газов перед пароперегревателем коэффициент теплопередачи пароперегревателя заметно уменьшается, а поверхность нагрева его сильно растет, что явно невыгодно.

Надежнее, в смысле меньшего износа элементов пароперегревателя, даже при нормальной нагрузке, иметь температуру за первым ходом не выше  $750^{\circ}\text{C}$ .<sup>2)</sup>

Задаваясь желательной температурой газов перед пароперегревателем  $T'_{пс.}$  в пределах от  $600$  до  $750^{\circ}\text{C}$  и выбирая на основании опубликованных испытаний величину коэффициента теплопередачи первого хода  $K_1$ , определяют поверхность нагрева первого хода  $H_1$  по формуле (270).

*Пример 30.* Для получения 12 тонн пара в час, при давлении  $24 \text{ кг/см}^2$  и температуре  $375^{\circ}\text{C}$ , решено поставить 2 вертикально-водотрубных котла по  $150 \text{ кв. м}$  поверхности нагрева с пароперегревателями и экономайзером для подогрева воды. Топливо — подмосковный уголь с содержанием углерода  $38,33\%$ , водорода  $3,13\%$ , кислорода  $7,06\%$ , азота  $0,65\%$ , серы  $3,58\%$ , золы  $15,75\%$  и влаги  $31,5\%$  сжигается в топке при коэффициенте избытка воздуха  $1,3$ . Температура воздуха, поступающего в топку  $30^{\circ}\text{C}$ ; его относительная влажность  $50\%$ . Температура питательной воды при входе в экономайзер  $60^{\circ}\text{C}$ . Желательная температура газов за экономайзером  $180^{\circ}\text{C}$ . Определить поверхность нагрева первого хода, если желают иметь температуру газов при входе в пароперегреватель  $700^{\circ}\text{C}$ .

<sup>1)</sup> См. формулы в след. главе XXIV.

<sup>2)</sup> Иногда приходится в ущерб надежности действия пароперегревателя сознательно отступать от высказанных здесь пожеланий; например, когда требуется иметь очень высокий перегрев пара или когда конструктивные соображения требуют сокращения размеров пароперегревателя; в этих случаях по необходимости приходится повышать температуру газов перед пароперегревателем.

*Решение.* Задаваясь потерями от химической неполноты сгорания 1,5%, от механической неполноты сгорания 3,5% и в окружающую среду топкой 3%, котлом 3,5%, пароперегревателем 0,5% и экономайзером 1,5%, а также коэффициентами избытка воздуха в топке 1,3, за котлом 1,4, перед экономайзером 1,5 и за экономайзером 1,7 и вспоминая, что состав газов в топке нами уже считал в примере 29 (см. стр. 137), получим:

$$(V_{\text{ст.}})_{\text{т.}} = 5,09; \text{ } ^1)$$

$$(G_{\text{вп.}})_{\text{т.}} = 0,6921; \text{ } ^1)$$

$$Q_{\text{т.}} = 3595 + 0,2332 \cdot 1,3 \cdot 5,359 \cdot 30 + 609,1 \cdot 0,0137 \cdot 1,3 \cdot 5,359 = 3702; \text{ } ^2)$$

$$T_{\text{т.}} = 1666^{\circ} \text{C}; \eta_{\text{т.}} = 100 - (1,5 + 3,5 + 3) = 92;$$

$$T_{\text{т.}} = 0,01 \cdot 92 \cdot (1 - 0,2) \cdot 1666 = 1226;$$

$$(V_{\text{ст.}})''_{\text{э.}} = 6,697; \text{ } ^3) \quad (G_{\text{вп.}})''_{\text{э.}} = 0,7215; \text{ } ^3)$$

$$Q''_2 = (6,697 \cdot 0,3203 + 0,7215 \cdot 0,4605) \cdot (180 - 30) = 372;$$

$$q''_2 = \frac{372}{3595} \cdot 100 = 10,35\%;$$

$$q_5 = 3 + 3,5 + 0,5 + 0,5 + 1,5 = 9\%;$$

$$\eta_{\text{ку.}} = 100 - (10,35 + 1,5 + 3,5 + 9) = 75,65\% \text{ (брутто);}$$

$$B = \frac{12000 \cdot (764 - 60)}{3595 \cdot 0,7565} = 3106 \text{ кг/час.}$$

Желая получить температуру перед входом в пароперегреватель  $700^{\circ} \text{C}$  и оценивая  $K_1 = 40 \text{ кал/кв. м. } ^{\circ}\text{C час} \text{ } ^4)$  имеем:

$$H_1 = \frac{(5,09 \cdot 0,3718 + 0,6921 \cdot 0,5463) \cdot (1 - 0,02)^5 \cdot 3106}{40} \cdot \ln \frac{1226 - 223}{700 - 223} =$$

$$= 128,4 \text{ кв. м (для 2 котлов).}$$

Следовательно поверхность нагрева первого хода в каждом котле должна быть выполнена равной 64,2 кв. м или  $\frac{64,2}{150} \cdot 100 = 42,8\%$  от поверхности нагрева.

<sup>1)</sup> Здесь индекс т. указывает, что объем газов вычислен по анализу газов в топке.

<sup>2)</sup> Старое обозначение.

<sup>3)</sup> За экономайзером при  $\alpha''_{\text{э.}} = 1,7$ .

<sup>4)</sup>  $K_1$  зависит от допущенных скоростей газов в газоходе и от расположения труб относительно раскаленных стенок кладки и частично пламени. Имеется также некоторая связь между прямой отдачей  $\sigma$  и  $K_1$ ; уменьшая  $\sigma$ , мы содействуем увеличению  $T_{\text{т.}}$ , а следовательно, увеличению средней температуры газов и температуры стенок кладки, что также влечет к повышению  $K_1$ .

<sup>5)</sup> Множитель  $(1 - 0,02)$  учитывает потерю тепла кладкой первого хода, принятую нами в 2%.



## ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ЧЕТВЕРТАЯ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА  
ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ.

При передаче тепла от продуктов сгорания топлива к перегреваемому пару переменными являются как температура газов, от  $T'_{пе.}$  при входе и до  $T''_{пе.}$  при выходе, так и температура перегреваемого пара, от  $t_{п.}$  для насыщенного пара и до  $t_{пе.}$  для перегретого при выходе.

В зависимости от того, имеем ли мы параллельный ток или противоток газа и пара, нужно пользоваться соответственно уравнением (259) или (260).

Но для упрощения в расчетах допускается определение величины поверхности нагрева, пользуясь следующими уравнениями:

$$H_{пе.} \cdot K_{пе.} \cdot \left[ \frac{T'_{пе.} + T''_{пе.}}{2} - \frac{t_{пе.} + t_{в.}}{2} \right] = D \cdot (i_{пе.} - i_x); \quad (276)$$

$$\begin{aligned} [(G_{пс.} \cdot C_{пс.})_т. \cdot T'_{пе.} - (G_{пс.} \cdot C_{пс.})_к. \cdot T''_{пе.}] \cdot \mu_{пс.} \cdot B = D \cdot (i_{пе.} - i_x) + \\ + H_б. \cdot K_б. \cdot \left( \frac{T'_{пе.} + T''_{пе.}}{2} - t_б. \right) + \\ + (\alpha_к. - \alpha_т.) \cdot G_0 \cdot (1 + \psi) \cdot B \cdot C \cdot (T''_{пе.} - t_{в.}) + Q_5^{пе.} \cdot B \quad (277) \end{aligned}$$

Первое из этих уравнений получено подстановкою вместо  $T$  и  $t$  в формулу (233) средних температур газов и перегретого пара соответственно, при чем  $D$  учитывает весь пар, проходящий через пароперегреватель в кг/час.

$H_{пе.}$  — поверхность нагрева пароперегревателя в кв. метрах;

$K_{пе.}$  — коэффициент теплопередачи пароперегревателя в калориях кв. м °С час.

Второе уравнение (277) есть результат теплового баланса тепла в пароперегревателе, при чем:

$(G_{пс.} \cdot C_{пс.})_т. \cdot T'_{пе.}$  — тепло, заключенное в газах, полученных от сгорания 1 кг топлива и нагретых до температуры  $T'_{пе.}$  °С. При этом объем газов условно считается по составу газов в топке, что отмечено индексом т., стоящим у произведения:  $(G_{пс.} \cdot C_{пс.})_т.$

$(G_{пс.} \cdot C_{пс.})_к. \cdot T''_{пе.}$  — тепло, заключенное в газах, полученных от сгорания в топке 1 кг топлива и нагретых до температуры  $T''_{пе.}$ , при этом объем газов за перегревателем условно считается по анализу газов за котлом, что и отмечено индексом к., стоящим у произведения:  $(G_{пс.} \cdot C_{пс.})_к.$

$\mu_{\text{пе.}}$  — доля газов, протекающих через пароперегреватель. В частном случае, когда пароперегреватель включен так, что все газы, выходящие из 1-го хода, направляются через пароперегреватель и далее во 2-й ход, коэффициент  $\mu_{\text{пе.}}$  равен единице ( $\mu_{\text{пе.}} = 1$ ). Этот случай мы имеем, например, в котлах Бабкок-Вилькокс, большинство которых обмуровывается так, что все газы из первого хода направляются в пароперегреватель.

$B$  — часовой расход топлива в килограммах.

$H_6$  — поверхность нагрева барабана котла, если она находится в газоходе пароперегревателя.

$K_6$  — коэффициент теплопередачи барабана, принимаемый равным от 15 до 25 *кал/кв. м °С час* в зависимости от средней температуры газов, омывающих барабан.

$Q_5^{\text{пе.}}$  — тепло (*кал*), теряемое кладкой пароперегревателя в окружающую среду, отнесенное к 1 *кг* сожженного в топке топлива.

Третье слагаемое в правой части равняется (277), а именно произведение

$$(\alpha_{\text{к.}} - \alpha_{\text{т.}}) \cdot G_0 \cdot (1 + \psi) \cdot B \cdot C \cdot (T''_{\text{пе.}} - t_{\text{в.}})$$

учитывает затрату тепла на нагрев воздуха, <sup>1)</sup> присосанного в газоходы котла через неплотности в обдувочных окнах и через трещины в кладке. <sup>2)</sup>

При расчете пароперегревателя искомыми величинами могут быть:

- 1)  $H_{\text{пе.}}$  и  $T''_{\text{пе.}}$ ;
- 2)  $H_{\text{пе.}}$  и  $\mu_{\text{пе.}}$ ;
- 3)  $T''_{\text{пе.}}$  и  $t_{\text{пе.}}$ ;
- 4)  $T''_{\text{пе.}}$  и  $\mu_{\text{пе.}}$ .

При обработке данных испытаний обычно вычисляются  $K_{\text{пе.}}$  и  $Q_5^{\text{пе.}}$ , которыми впоследствии при расчете перегревателей приходится задаваться. Поэтому следует помнить, что объем газов перед и за перегревателем, подсчитываемый условно по составу газов в топке и за котлом, сказывается лишь на величине коэффициента теплопередачи  $K_{\text{пе.}}$  и потери в окружающую среду  $Q_5^{\text{пе.}}$ , определяемых тем же методом на основании данных испытаний.

<sup>1)</sup> См. формулы (54), (50), (200) и др.

<sup>2)</sup> Надо следить, чтобы их не было.

При расчете пароперегревателя желательно удовлетворить неравенству:

$$T''_{пе.} \leq t_{пе.} + 50; \quad (278)$$

если этого достигнуть не удастся, то необходимо осуществить противоток пара и газа в пароперегревателе.

При полном противотоке температура газов за перегревателем может быть понижена до:

$$T''_{пе.} = t_{п.} + 50 \quad (279)$$

Надежнее в смысле большей гарантии требуемого перегрева пара все же держаться более высоких температур газов за перегревателем и во всяком случае даже при наличии полного противотока удовлетворить неравенству:

$$T''_{пе.} > t_{п.} + 50 \quad (280)$$

Когда пароперегреватель включен последовательно и может быть регулируемо количество газов, через него проходящее (обычная обмуровка котлов Штейнмюллера — горячая заслонка), то при закрытой заслонке, т.-е. при желании пропустить через пароперегреватель все газы, коэффициент  $\mu_{пе.}$  следует принимать равным 0,9 — 0,95, чем учитывается пропуск через заслонку от 5 до 10% всего количества газов, подходящих к пароперегревателю, ибо гарантировать абсолютную герметичность горячей заслонки на практике невозможно.

При расположении пароперегревателя в ответвлении, когда газы поступают и проходят одновременно частью через пароперегреватель, частью же через 2-й ход, количество газов, проходящих через пароперегреватель определяется вычислением коэффициента  $\mu_{пе.}$ , который в этом случае имеет значение 0,7 — 0,2.

Последний способ включения пароперегревателя позволяет расположить заслонку в наиболее удобном месте, именно за перегревателем, где износ ее будет меньше, так как температура газов там меньше, а следовательно, и поддерживать ее в порядке при эксплуатации будет легче.

Такая обмуровка пароперегревателя очень часто встречается в вертикально-водотрубных котлах Гарбе (см. фиг. 1 на стр. 8).

Выбор величины коэффициента теплопередачи пароперегревателя может быть сделан, руководствуясь следующими данными:

УДУНТ  
(ДИТ)

ТАБЛИЦА 19.

Коэффициент теплопередачи пароперегревателя.	$\frac{\text{ккал}}{\text{кв. м}^\circ\text{С час.}}$
Пароперегреватель без лучеиспускающей кладки.	10 — 20
При наличии лучеиспускающей кладки.	25 — 40
Пароперегреватель имеет своды сверху и снизу (по опытам с горизонтальным водотрубным котлом)	0,032 ( $T'_{\text{пе.}} + T''_{\text{пе.}}$ )

Средняя скорость пара в пароперегревателе не должна быть меньше 6 м/сек; желательно иметь ее 15 — 20 м/сек. Дальнейшее увеличение скорости пара ведет уже к большим потерям давления пара, что невыгодно отражается на располагаемом теплосодержании в паровых двигателях. Падение давления пара в перегревателе может быть допущено от 0,25 до 0,4 кг/см<sup>2</sup>. Среднюю скорость газов желательно иметь от 4 до 6 м/сек.

В формулы для расчета поверхности нагрева пароперегревателя входит  $i_x$  — теплосодержание влажного пара, которое определяется или по формуле:

$$i_x = q + x \cdot r, \quad (281)$$

где  $q$  — теплота жидкости,  $r$  — теплота парообразования, а  $x$  — паросодержание, при чем  $q$  и  $r$  находятся по заданному давлению, пользуясь таблицами водяного пара (см. в приложении табл. VI — IX, стр. 206 — 210).

Можно проще найти  $i_x$  непосредственно по  $I—S$  диаграмме (см. приложение), если известно давление влажного пара (или его температура) и его паросодержание.

Паросодержанием называется содержание сухого пара (в килограммах), приходящееся на 1 кг влажного пара. Чем форсированнее работает котел, тем он дает более влажный пар, и тем, следовательно, с меньшим паросодержанием последний будет входить в пароперегреватель, на долю которого в этом случае выпадает необходимость не только перегревать пар, но и предварительно его досушивать.

К сожалению, в литературе данные о влажности пара, получаемого в котлах различных систем, очень скудны.

УДНБ  
УДУНТ  
(ДНТ)

Проф. К. В. Кирш считал возможным для всех систем котлов принимать ее равной 0,5 — 1%.

Мы полагаем более осторожным при расчетах учитывать систему котла и степень его форсировки.

ТАБЛИЦА 20.

Тип котлов и условия работы.		Паронапряжение поверхности нагрева ( $\lambda = 640$ ).	Влажность пара.	Паросодержание $x$
		кг/м <sup>2</sup> · час.	%	кг/кг.
Жаротрубные.	Слабо нагруженные .	< 15	0,5 — 1	0,995 — 0,99
	Умеренно нагруженные .	15 — 25	1 — 2	0,99 — 0,98
	Форсированно работающие .	> 25	2 — 3	0,98 — 0,97
Горизонтально-водотрубные.	Слабо нагруженные .	< 15	0,5 — 1,5	0,995 — 0,985
	Умеренно нагруженные .	15 — 25	1 — 3	0,99 — 0,97
	Форсированно работающие .	> 25	2 — 5	0,98 — 0,95
Вертикально-водотрубные.	Слабо нагруженные .	< 25	1 — 3	0,99 — 0,97
	Умеренно нагруженные .	25 — 35	3 — 5	0,97 — 0,95
	Форсированно работающие .	> 35	4 — 6	0,96 — 0,94
Котлы большой мощности .		40 и >	5 — 15	0,95 — 0,85

В виду того, что заслонка, регулирующая количество газов, проходящих через пароперегреватель, часто причиняет неприятные хлопоты в эксплуатации, в последнее время наблюдается тенденция совсем от нее избавиться, как это давно уже рекомендовала фирма Бабкок-Вилькоккс. Чтобы удовлетворить требование постоянства температуры перегретого пара, в этом случае расчет размеров поверхности нагрева пароперегревателя ведут с запасом, а затем излишек перегрева снимают в поверхностном охладителе перегретого пара, при чем в качестве охладителя чаще всего используется питательная вода, теплота которой впоследствии поступает обратно в котел.

УДУНТ  
(ДИТ)

С целью иметь постоянную температуру перегретого пара пароперегреватель разбивают на две части и одну из частей размещают в топке таким образом, чтобы она получала тепло излучением. Тогда при падении нагрузки относительное количество тепла, воспринятое лучепоглощением в топке, возрастает, а количество тепла, воспринятое в газоходах, уменьшается, в виду падения скоростей. При форсировке котлов будет обратное явление. Возможно так разбить поверхность нагрева пароперегревателя на части, что в результате можно будет иметь температуру перегретого пара постоянной для достаточно широких пределов колебаний нагрузки котла.

Недостаток этого способа — очень тяжелые условия работы той части поверхности нагрева, которая будет находиться в топке, особенно в первые моменты остановок котла, когда кладка раскалена, а паропотребление прекращается.

*Пример 31.* Определить поверхность нагрева пароперегревателя для условий примера 30 (см. стр. 142).

*Решение.* Предполагая параллельное со вторым ходом включение пароперегревателя в газоход и задаваясь  $\mu_{\text{пе.}} = 0,6$  и  $k_{\text{пе.}} = 35 \text{ кал/кв. м } ^\circ\text{С час}$  получим по формуле (276): <sup>1)</sup>

$$N_{\text{пе.}} \cdot 35 \cdot \left[ \frac{700 + T''_{\text{пе.}}}{2} - \frac{375 + 223}{2} \right] = 12\,000 \cdot (764 - 653,2)$$

и по формуле (277):

$$[(5,09 - 0,335 + 0,6921 \cdot 0,485) \cdot 700 + (5,488 - 0,323 + 0,995 \cdot 0,455) \cdot T''_{\text{пе.}}] \times \\ \times 0,6 \cdot 3106 = 12\,000 \cdot (764 - 653,2) + (1,5 - 1,4) \cdot 5,359 \cdot (1 + 0,0137) \cdot 3106 \times \\ \times 0,241 \cdot (T''_{\text{пе.}} - 30) + 17,98 \cdot 3106, \text{ } ^2)$$

откуда имеем  $T''_{\text{пе.}} = 300^\circ\text{С}$  и  $N_{\text{пе.}} = 189 \text{ кв. м}$  или на один котел  $94,5 \text{ кв. м}$ , что составляет 63% от поверхности нагрева котла.

Температура  $T''_{\text{пе.}} = 300^\circ\text{С}$  указывает на необходимость устройства противотока газов и пара; в противном случае перегрев пара до  $375^\circ\text{С}$  получен быть не может.

При противотоке будем иметь:

$$700 > 375 \text{ и } 300 > 223,$$

то-есть неравенство (280) удовлетворено полностью.

Предполагая последовательное включение пароперегревателя (т.-е. считая, что все газы после первого хода направляются в пароперегреватель и затем

<sup>1)</sup> При подсчете принята влажность пара 5%, следовательно  $i_x = 227,9 + 0,95 \cdot 447,7 = 653,2$ .

<sup>2)</sup> Объем газов и вес водяных паров за перегревателем считается по составу газов за котлом и в данном случае равен  $(V_{\text{сг.}})_{\text{к.}} = 5,488$  и  $(G_{\text{вл.}})_{\text{к.}} = 0,6995$ .

уже во второй ход), получим (при том же расчетном  $K_{\text{пе.}} = 35 \text{ кал/кв. м } ^\circ\text{С час}$ ) температуру газов после пароперегревателя равной  $T''_{\text{пе.}} = 437^\circ\text{С}$ , а поверхность нагрева пароперегревателем  $H_{\text{пе.}} = 141 \text{ кв. м}$ , или на один котел  $70,5 \text{ кв. м}$ , что составляет  $47\%$  от поверхности нагрева котла вместо  $63\%$ , получаемых при параллельном включении пароперегревателя.

Если же допустить температуру газов при входе в пароперегреватель равной  $900^\circ\text{С}$ , вместо принятой ранее  $700^\circ\text{С}$ , то получим температуру газов за пароперегревателем, при проходе всех газов через пароперегреватель, равной  $T''_{\text{пе.}} = 623^\circ\text{С}$ , а поверхность нагрева пароперегревателя при тех же условиях равной  $82,1 \text{ кв. м}$ , или  $41,05 \text{ кв. м}$  на один котел, что составляет  $27,4\%$  от поверхности нагрева котла, вместо ранее подсчитанных  $47\%$ .

Повышение температуры газов перед пароперегревателем достигается уменьшением поверхности нагрева первого хода котла; при желании иметь температуру газов при входе в пароперегреватель равной  $900^\circ\text{С}$  вместо  $700^\circ\text{С}$  мы должны пересчитать поверхность нагрева первого хода (см. пример 30, стр. 142).

Полагая  $K_1 = 40 \text{ кал/кв. м } ^\circ\text{С час}$  получим:

$$H_1 = \frac{(5,09 \cdot 0,3778 + 0,6921 \cdot 0,5563) \cdot 3106 \cdot 0,98}{40} \cdot \ln \frac{1226 - 223}{900 - 223} = 67,5 \text{ кв. м,}$$

или  $\frac{67,5}{300} \cdot 100 = 22,5\%$  от поверхности нагрева котлов вместо  $42,8\%$  (см. стр. 143).

## ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ПЯТАЯ.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОВ ЗА КОТЛОМ.

При заданной или выбранной поверхности нагрева котла  $H_{\text{к.}}$  путем вычитания величины 1-го хода  $H_1$  определяется суммарная поверхность нагрева последующих ходов котла  $H_2$ :

$$H_2 = H_{\text{к.}} - H_1 \quad (282)$$

Затем, в зависимости от конструкции котла и способа его обмуровки, расчет ведут различными путями, а именно: если оставшаяся поверхность нагрева ( $H_2 \text{ кв. м}$ ) однородна в смысле условий теплопередачи, то расчет ведут по уравнению, аналогичному (270), сразу для всей поверхности нагрева ( $H_2$ ):

$$H_2 = \frac{(G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})_{\text{к.}} \cdot B}{K_2} \cdot \ln \frac{T'_2 - t_{\text{н.}}}{T''_2 - t_{\text{н.}}}, \quad (283)$$

где:

$K_2$  — средний коэффициент теплопередачи в рассчитываемых ходах;

$T'_2$  — температура газов при входе в них;

$T''_2$  — » » » выходе из них;

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)

- $t_{п.}$  — температура насыщенного пара заданного давления;
- $(G_{гс.} \cdot C_{гс.})_{к.}$  — удельная теплота, приходящаяся на 1 кг сожженного топлива, подсчитываемая по составу газов за котлом, определенному при расчете пароперегревателя по формулам (78) или (131), а средние теплоемкости сухих газов и водяных паров вычисляют по формулам (184) и (185), подставляя в них вместо  $T$  сумму  $(T'_2 + T''_2)$ , при чем температурой  $T''_2$  предварительно приходится задаваться. Рекомендуется пользоваться при этом графиком (см. фиг. 5 на 79 стр.).

По формуле (283) определяют при расчетах температуру газов  $T''_2$ , а при опытах — коэффициент теплопередачи  $K_2$ , которым в первом случае задаются на основании следующих опытных данных:

ТАБЛИЦА 21.

Коэффициент теплопередачи вторых ходов.	$\frac{\text{Кал}}{\text{кв. м}^\circ\text{С час.}}$
Горизонтально-водотрубные котлы .	16 — 20
Вертикально-водотрубные котлы при 8 — 10 рядах трубок в ходу .	18 — 22
Вертикально-водотрубные котлы при 4 — 5 рядах трубок в ходу .	22 — 25
Боковые хода цилиндрических барабанов, где $T'$ и $T''$ суть температуры газов соответственно при входе и выходе из рассчитываемого газохода .	$K_2 = 0,0335 \cdot (T' + T'') - 3$
Дымогарные трубки (диаметр = 75 мм), включая и теплопоглощение трубной решетки, против которой расположена обмуровка котла .	$0,0185 \cdot (T' + T'') - 9$
При наличии в дымогарных трубках железных плоских вставок, во всю длину трубок простирающихся <sup>1)</sup> .	$0,0285 \cdot (T' + T'') - 19$

<sup>1)</sup> Наличие вставок в дымогарных трубах очень затрудняет эксплуатацию котельной и вряд ли может быть рекомендовано. Это мнение иногда неверно переносят и на продольные шамотные стенки в жаровых трубах; последние безусловно следует самым настойчивым образом рекомендовать.



Температура газов при входе в рассчитываемый газоход  $T'_2$  известна на основании расчета поверхностей нагрева первого хода (см. главу XXIII) и пароперегревателя (см. главу XXIV).

При параллельном включении пароперегревателя, когда струя газов после первого хода разветвляется на две струи, одна из которых идет через перегреватель (доля газов равная  $\mu_{\text{пе.}}$ ), а другая направляется в рассчитываемый газоход (доля газов равная  $1 - \mu_{\text{пе.}}$ ), температура газов  $T'_2$  принимается равной  $T'_{\text{пе.}}$ , но в этом случае не надо забывать вводить в формулу (283) поправочный множитель  $(1 - \mu_{\text{пе.}})$ , учитывающий долю газов, протекающую через рассчитываемый газоход.

Следовательно при параллельном расположении пароперегревателя и второго газохода формула (283) приобретает следующий вид:

$$H_2 = \frac{(G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})_{\text{к.}} \cdot B \cdot (1 - \mu_{\text{пе.}})}{K_2} \cdot \ln \frac{T'_{\text{пе.}} - t_{\text{в.}}}{T''_{\text{пе.}} - t_{\text{н.}}} \quad (284)$$

Так как смешение струй газов, обогревавших пароперегреватель и последние ходы котла, происходит в этом случае после их выхода из соответствующих газоходов (см. фиг. 1 на стр. 8), то температура газов за котлом  $T_{\text{к.}}$  в данном случае определяется на основании правила смешения газов с разной температурой, которое приводит к следующей простой формуле:

$$T_{\text{к.}} = (1 - \mu_{\text{пе.}}) \cdot T''_2 + \mu_{\text{пе.}} \cdot T'_{\text{пе.}} \quad (285)$$

При последовательном же включении пароперегревателя, когда газы после обогревания поверхности нагрева, расположенной в первом ходе котла, поступают в пароперегреватель, а после обогревания последнего направляются во 2-й ход котла, температура при входе во 2-й ход,  $T'_2$ , очевидно равна температуре газов, выходящих из пароперегревателя,  $T''_{\text{пе.}}$ , конечно при условии, что все газы протекают через пароперегреватель.

При наличии же заслонки перед пароперегревателем, позволяющей регулировать долю газов  $\mu_{\text{пе.}}$ , протекающих через пароперегреватель, температура газов, входящих во 2-й ход котла  $T'_2$ , определяется как средняя температура смеси двух газовых потоков, один из которых прошел через пароперегреватель ( $\mu_{\text{пе.}}$ ) и имеет температуру  $T''_{\text{пе.}}$ , а другой прошел помимо пароперегревателя ( $1 - \mu_{\text{пе.}}$ ) непосредственно во 2-й ход и имеет температуру  $T'_{\text{пе.}}$ .

$$T'_2 = (1 - \mu_{\text{пе.}}) \cdot T'_{\text{пе.}} + \mu_{\text{пе.}} \cdot T''_{\text{пе.}} \quad (286)$$

В дальнейшем расчет ведется по формуле (283), пользуясь которой определяют  $T''_2$ , равную в данном случае искомой температуре за котлом  $T_k$ .

Формулы (283) и (284) не учитывают тепла, теряемого кладкой в окружающую среду, что отразится, конечно, и на величине определяемой температуры газов за котлом; поправка легко вносится, если оценить эту потерю.

Пусть она, будучи отнесена к 1 кг сожженного топлива, равна  $Q''_5$  кал; тогда вместо  $(G_{пс.} \cdot C_{пс.})_к.$  в формулы (283) и (284) следует внести величину:  $(G_{пс.} \cdot C_{пс.})_к. \left(1 - \frac{Q''_5}{Q_{раб.}}\right)^{.1}$

Заканчивая на этом рассмотрение вопроса об определении температуры газов за котлом, отметим, что в тех случаях, когда условия для работы поверхностей нагрева весьма различны, в смысле условий передачи тепла, что учитывается на практике величиной коэффициента теплопередачи их, рекомендуется, пользуясь уравнениями (283) и (284), решать их для каждого газохода в отдельности, учитывая не только разницу коэффициентов теплопередачи, но и изменяющийся, за счет присоса, объем газов и их теплоемкость, зависящую от средней температуры газов в газоходе.

Такой случай, когда необходимо рассчитывать отдельно каждый последующий газоход, мы имеем, например, в комбинированных котлах, где поверхности нагрева весьма разнообразно воспринимают тепло обогревающих их газов.

*Пример 32.* Определить температуру газов за котлом для условий примера 30 (см. стр. 142).

*Решение.* При расчете пароперегревателя (см. стр. 149) мы приняли  $\mu_{пе.} = 0,6$ , что дает при параллельном расположении пароперегревателя  $(1 - \mu_{пе.}) = 0,4$ . Задаваясь  $K_2 = 22$  и зная по формуле (282):

$$H_2 = 2 \cdot 150 - 128,4 = 171,6,$$

получим согласно формуле (284) уравнение: <sup>2)</sup>

$$171,6 = \frac{(5,488 \cdot 0,3455 + 0,6995 \cdot 0,5025) \cdot 0,985}{22} \cdot 0,4 \cdot 3106 \cdot \ln \frac{700 - 223}{T''_2 - 223},$$

<sup>1)</sup> При грубых расчетах этой поправкою, также как и аналогичною поправкою в расчете 1-го хода (см. стр. 141), можно пренебречь.

<sup>2)</sup> Множитель 0,985 учитывает потерю тепла кладкой второго хода, оцененную нами в 1,5%. Всего котлом потеряно  $2 + 1,5 = 3,5$ , а с пароперегревателем и топкой  $3,5 + 0,5 + 3 = 7\%$ .

откуда  $T'_2 = 343^\circ \text{C}$  (при выходе из второго хода котла до смешения с газами из газопроводов пароперегревателя).

После смешения получим:

$$T_{\text{к.}} = 0,6 \cdot 300 + 0,4 \cdot 343 = 317^\circ \text{C (за котлом).}$$

## ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ШЕСТАЯ.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА ЭКОНОМАЙЗЕРА ДЛЯ ПОДОГРЕВА ВОДЫ.

При наличии промежуточного борова между котлом и экономайзером обычно наблюдается присос воздуха как через неплотности в самом борове (что должно быть в эксплуатации по возможности своевременно устраняемо), так и через неплотно прикрытые заслонки неработающих котлов, обслуживаемых общим боровом.

Поэтому температура газов при входе в экономайзер ( $T'_э.$ ) обычно бывает ниже температуры газов за котлом ( $T_{\text{к.}}$ ) не только за счет потери тепла кладкой борова в окружающую среду  $Q_5^6$ , но и за счет разжижения продуктов сгорания холодным воздухом, проникшим в боров через неплотности в кладке и в регистрах.

Уравнение теплового баланса для борова напишется так:

$$\begin{aligned} & (G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})_{\text{к.}} \cdot B \cdot T_{\text{к.}} - (G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})'_{\text{э.}} \cdot B \cdot T'_э. = \\ & = (\alpha'_{\text{э.}} - \alpha_{\text{к.}}) \cdot G_0 \cdot (1 + \psi) \cdot C \cdot B \cdot (T'_э. - t_{\text{в.}}) + Q_5^6 \cdot B. \end{aligned} \quad (287)$$

или после сокращения на  $B$ :

$$\begin{aligned} & (G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})_{\text{к.}} \cdot T_{\text{к.}} - (G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})'_{\text{э.}} \cdot T'_э. = \\ & = (\alpha'_{\text{э.}} - \alpha_{\text{к.}}) \cdot G_0 \cdot (1 + \psi) \cdot C \cdot (T'_э. - t_{\text{в.}}) + Q_5^6, \end{aligned} \quad (288)$$

где:

$(G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})'_{\text{э.}}$  — удельная теплота продуктов сгорания, приходящаяся на 1 кг сожженного топлива, подсчитываемая по составу газов перед экономайзером, на что и указывают индексы  $э.$

$Q_5^6$  — потеря тепла боровом в окружающую среду, отнесенная к 1 кг сожженного топлива.

Остальные обозначения уже известны.

Проф. К. В. Кирш дает упрощенную формулу для определения  $T'_э.$  в таком виде:

$$T'_э. \cdot \alpha'_{\text{э.}} = T_{\text{к.}} \cdot \alpha_{\text{к.}} + (\alpha'_{\text{э.}} - \alpha_{\text{к.}}) \cdot t_{\text{в.}} - \frac{Q_5^6}{0,33 V_0} \quad (289)$$

Дальнейший расчет экономайзера ведется путем решения совместно двух следующих уравнений:

$$[(G_{\text{гс.}} \cdot C_{\text{гс.}})'_{\text{э.}} \cdot T'_{\text{э.}} - (G_{\text{гс.}} \cdot C_{\text{гс.}})''_{\text{э.}} \cdot T''_{\text{э.}}] \cdot \mu_{\text{э.}} \cdot B = W \cdot (t''_{\text{э.}} - t'_{\text{э.}}) + (\alpha''_{\text{э.}} - \alpha'_{\text{э.}}) \cdot G_0 \cdot (1 + \psi) \cdot C \cdot B \cdot (T''_{\text{э.}} - t_{\text{в.}}) + Q_5^{\text{э.}} \cdot B; \quad (290)$$

$$H_{\text{э.}} \cdot k_{\text{э.}} \cdot \left[ \frac{T'_{\text{э.}} + T''_{\text{э.}}}{2} - \frac{t'_{\text{э.}} + t''_{\text{э.}}}{2} \right] = W \cdot (t''_{\text{э.}} - t'_{\text{э.}}), \quad (291)$$

где:

$(G_{\text{гс.}} \cdot C_{\text{гс.}})'_{\text{э.}} \cdot T'_{\text{э.}}$  — тепло, заключенное во входящих в экономайзер газах, приходящихся на 1 кг сожженного топлива;

$(G_{\text{гс.}} \cdot C_{\text{гс.}})''_{\text{э.}} \cdot T''_{\text{э.}}$  — тепло, заключенное в газах при выходе из экономайзера, отнесенное к 1 кг сожженного топлива;

$\mu_{\text{э.}}$  — поправочный коэффициент, учитывающий действительную долю газов, протекающих через экономайзер;

$t''_{\text{э.}}$  — температура воды, выходящей из экономайзера (°С);

$t'_{\text{э.}}$  — » » входящей в экономайзер (°С);

$W$  — полный часовой расход воды, подогреваемой экономайзером (кг);

$B$  — часовой расход топлива;

$Q_5^{\text{э.}}$  — потеря в окружающую среду экономайзером;

$H_{\text{э.}}$  — поверхность нагрева экономайзера (кв. м);

$k_{\text{э.}}$  — коэфф. теплопередачи экономайзера (кал/кв. м.°С. час).

Коэффициент теплопередачи экономайзера зависит от ширины экономайзера, длины его труб, средней температуры газов и от их скорости.

При хорошем уходе, своевременной очистке от накипи, сажи и золы можно для чистых поверхностей нагрева считать:

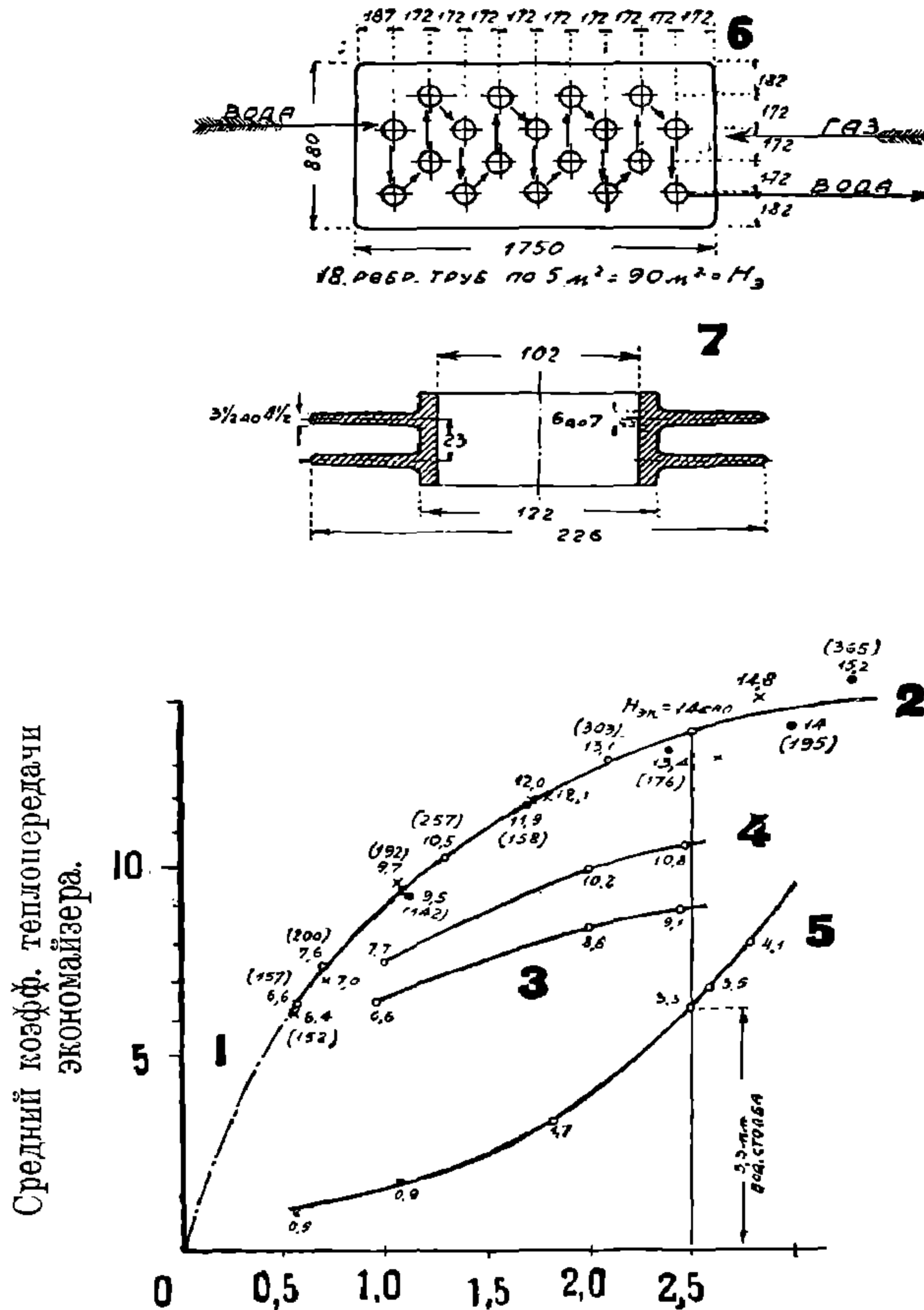
ТАБЛИЦА 22.

Коэффициент теплопередачи экономайзера.	$\frac{\text{Кал}}{\text{кв. м} \cdot \text{°С} \cdot \text{час.}}$
Тонкотрубные железные экономайзеры Шмидт, Шульц и др..	15 — 22
Чугунные экономайзеры: с гладкими трубами (Грин) при средней скорости газов около 4 м/сек	14 — 16
с ребристыми трубами (Каблиц, Феге и др.) при скорости газов около 2 — 2,5 м/сек	12 — 14

НЕ  
УДУНТ  
(ДИТ)

Влияние скорости газов в экономайзере на его коэффициент теплопередачи весьма хорошо можно иллюстрировать диаграммой, заимствуемой из трудов профессора К. В. Кирш.

Эта диаграмма (см. фиг. 14) показывает также зависимость коэффициента теплопередачи от загрязнения накипью и золою (ср. кривые 1 — 2, 4 и 3).



Средняя скорость газов в газоходе экономайзера (м/сек).

Фиг. 14. Диаграмма работы ребристого экономайзера Р. Каблица (1 элемент в 90 м<sup>2</sup>).

1 — 2. Кривая изменения коэфф. теплопередачи в зависимости от скорости газов при работе экономайзера без обдувки с 15/XI 1910 г. при нефтяном отоплении от 12 до 15 часов в сутки. Точки относятся к опытам 25 и 26/XI 1910 г. с горизонтально-водотрубным котлом, точки ● относятся к опытам 10 и 11/XII 1910 г. с комбинированным котлом.

УДУНТ  
(ДИТ)

3. Испытание 10/V 1911 г. В экономайзере слой зернистой накипи толщиной

$$\frac{0,5 + 0,5 + 0,5 + 0,5 + 1 + 1,5 + 2,5 + 3,5 + 4}{2} = 1,6 \text{ мм.}$$

Экономайзер до испытания работал 10 дней без внешней обдувки (при отоплении мелким антрацитом на пародутьевой топке). Осмотр обнаружил тонкий налет золы около 2 мм.

4. Испытание 11/V 1911 г. после полной очистки внешней поверхности (выемка), но с накипью. 20/XI 1911 г. была высверлена накипь из 8 горячих труб (остальные 10 труб были практически чисты), наружная поверхность была обдута паром и после этого получены точки × 25 и 26/XI 1911 г. и 1 и 2/XII 1911 г. (см. кривую 1—2).

5. Кривая сопротивлений в мм водяного столба 1 элемента в 90 м<sup>2</sup>, поставленного вдоль борова. (Такой элемент, поставленный поперек борова, дает сопротивление приблизительно в отношении  $\frac{1}{10}$  меньшее при тех же скоростях в живом сечении.)

6. Схема прохождения воды и газов в экономайзере. План элемента из 18 ребристых труб = 90 м<sup>2</sup> (размеры в мм).

7. Продольное сечение трубы экономайзера.

Учитывая трудность в рабочих условиях поддерживать экономайзер в безусловной чистоте, надежнее при расчетах задаваться коэффициентом теплопередачи  $K_z$  несколько меньшим, чем это дается для чистой поверхности.

Практически при загрязнении поверхности нагрева экономайзера как с внешней, так и с внутренней стороны, в допустимых, разумеется, пределах, можно считать, что коэффициент его теплопередачи  $K_z$  уменьшается в среднем на 10—20% в зависимости от системы экономайзера и установленного режима в котельной.

*При чрезмерном загрязнении экономайзера польза последнего становится не только сомнительной, но иногда даже отрицательной, так как бесполезно нагружаются питательные насосы, при сильном внутреннем загрязнении труб накипью и грязью, и дымосос, при наружном загрязнении их золою.*

О последнем обстоятельстве не следует забывать, ибо сопротивления в газоходах растут прямо пропорционально квадрату скорости газов.

Лучшее средство борьбы с загрязнением.

1) *Питание экономайзера очищенной водой и устройство в достаточном количестве золовых мешков, а также установка специальных золоуловителей при очень зольных топливах.* (Задача, которую должен обдумать проектирующий.)

2) *Регулярная обдувка и периодическая очистка поверхностей нагрева при эксплуатации.* (Обязанность, о которой должен не забывать заведующий паровым хозяйством.)

В тех случаях, когда приходится мириться с питанием экономайзера неочищенной водой, рекомендуется при проектировании проверять размер внутренней поверхности нагрева экономайзера, омываемой водой, на загрязнение ее накипью, толщина которой за период работы экономайзера между чистками его от накипи не должна достигать чрезмерной величины (не более 3 — 4 мм).

В уравнение (290) входит коэффициент  $\mu_{\text{э}}$ , учитывающий фактическую долю газов, протекающих через экономайзер.

Обычно при расчете экономайзера принимают коэффициент  $\mu_{\text{э}}$  равным единице, но на практике весьма часто приходится наблюдать большую утечку газов помимо экономайзера при плохо смонтированных или неудачной конструкции регистрах в обходном борове. Это обстоятельство следует учитывать при проектировании, конструируя соответствующим образом регистры. Безусловно желательно добиться герметичности регистров, что вполне возможно при сравнительно низких температурах, в которых им приходится работать.

К сожалению, проектирующие не уделяют должного внимания этим «мелочам», играющим весьма существенную роль в эксплуатации.

Итак, при расчете экономайзера мы имеем два уравнения (290) и (291), обычно с двумя неизвестными:

- 1)  $t''_{\text{э}}$  и  $H_{\text{эж}}$  при заданном  $T''_{\text{э}}$
- 2)  $T''_{\text{э}}$  и  $t''_{\text{э}}$  при заданном  $H_{\text{э}}$

При обработке же данных испытания неизвестными будут  $K_{\text{э}}$  и  $Q_{\text{в}}^{\text{э}}$ .

Величина же  $\mu_{\text{э}}$  может быть при испытании определена методом смешения двух струй газов, анализируя их состав и измеряя их температуру.

Если на фиг. 15 точкой I отметить газы, прошедшие через экономайзер (доля их =  $\mu_{\text{э}}$ ), точкой II — газы, прошедшие мимо экономайзера (доля их =  $1 - \mu_{\text{э}}$ ), и точкой III — газы после смешения, то будем иметь:

$$\begin{aligned} (G_{\text{лс.}} \cdot C_{\text{лс.}})_{\text{I}} \cdot T_{\text{I}} \cdot \mu_{\text{э}} + (G_{\text{лс.}} \cdot C_{\text{лс.}})_{\text{II}} \cdot T_{\text{II}} \cdot (1 - \mu_{\text{э}}) = \\ = (G_{\text{лс.}} \cdot C_{\text{лс.}})_{\text{III}} \cdot T_{\text{III}} \end{aligned}$$

(292)

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)

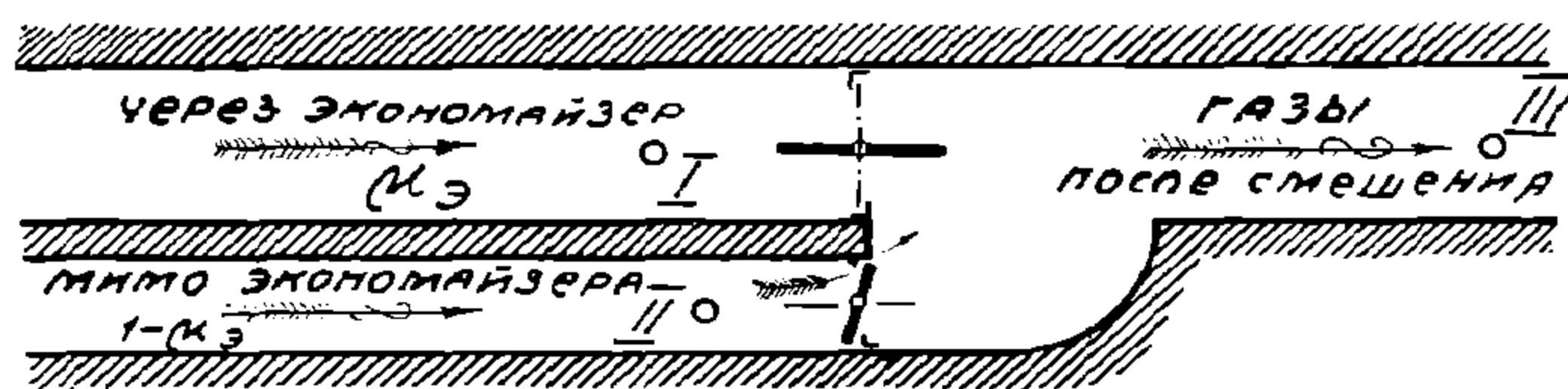
где  $(G_{\text{г.}} \cdot C_{\text{г.}}) \cdot T$  — тепло, заключенное в газах сечения, указанного соответствующим индексом (I, II и III), приходящееся на 1 кг сожженного топлива. <sup>1)</sup>

Когда задается температура уходящих газов  $T''_g$ , то по уравнению (290) определяется  $t''_g$  — температура воды при выходе из экономайзера, а затем по уравнению (291) определяют и  $H_g$  — поверхность нагрева экономайзера.

При расчете экономайзера, во избежание закипания в нем воды, рекомендуется иметь  $t''_g$  на 30—50° С ниже температуры насыщенного пара в котле ( $t''_n$  С), т.-е. желательно удовлетворить неравенству:

$$t''_g \leq t''_n - 50 \quad (293)$$

Обычно после определения по формуле (290) величины  $H_g$  перед проектирующим встает вопрос осуществить эту поверхность практически.



Фиг. 15. Схема расположения точек для анализа газов и измерения температур при определении  $\mu_g$ .

Для этого необходимо по заводским данным выбрать ближайшую подходящую поверхность нагрева экономайзера и повторным пересчетом определить  $T''_g$  — температуру уходящих газов, для каковой окончательный подсчет всех поверхностей нагрева повторяется сначала.

Необходимо при окончательном выборе не забыть проверить скорость газов в газоходе экономайзера, от которой, как мы раньше видели, находится в зависимости коэффициент теплопередачи экономайзера.

В главе XVIII (см. 97—98 стр.) указывалось на желательность питать экономайзер водою, предварительно подогретой до температуры  $t'_g > t_p$  (см. формулу 219).

Несмотря на это некоторые все же спрашивают: можно ли обойтись совсем без предварительного подогрева воды до экономайзера.

<sup>1)</sup> При этом исследовании присос воздуха в регистрах должен быть устранен.

УДМУНТ  
(ДИТ)



и питать экономайзер водою, температура которой ниже температуры точки росы?

Ответ на этот вопрос дают соображения коммерческого характера — что потребует меньших расходов в год: ремонт экономайзера и убытки в эксплуатации при его порче или стоимость предварительного подогрева воды. Практика высказывается за предварительный подогрев, ибо он избавляет нас от неприятностей, связанных со ржавлением экономайзера, и позволяет более легко справляться с паром при питании непосредственно в котел.

В заключение этой главы отметим, что формула (291) для расчета поверхности нагрева экономайзера по средним температурам газов и воды общепринята, но она не учитывает, <sup>1)</sup> например, выгоды противоточного расположения экономайзера по сравнению с параллельным движением в нем газов и воды.

Более правильно вести расчет поверхности нагрева, пользуясь вместо формулы (291) одной из формул (259) и (260), в зависимости от того, имеем ли мы параллельный ток газов и воды (формула 259) или противоток их (формула 260). В тех же случаях, когда имеет место движение воды, перпендикулярное току газов (например в экономайзерах Грина), можно воспользоваться формулой (262), подставляя в нее вместо  $t_2$  полусумму  $\frac{t'_{\text{э.}} + t''_{\text{э.}}}{2}$ .

*Пример 33.* Определить поверхность нагрева экономайзера для подогрева воды в условиях примера 30 (см. 142 стр.), если коэффициент теплопередачи оценен равным **13 кал/кв. м °С час.**

*Решение.* При наличии присоса в борове между котлом и экономайзером, оцененного  $\alpha'_{\text{э.}} - \alpha_{\text{к.}} = 1,5 - 1,4 = 0,1$ , имеем по формуле (288), при  $(V_{\text{сг.}})'_{\text{э.}} = 5,887$  и  $(G_{\text{вл.}})'_{\text{э.}} = 0,7068$ , следующее уравнение для определения  $T'_{\text{э.}}$ :

$$(5,488 \cdot 0,3235 + 0,6995 \cdot 0,466) \cdot 317 - (5,887 \cdot 0,3228 + 0,7068 \cdot 0,4647) \cdot T'_{\text{э.}} = 0,1 \cdot 5,359 \cdot (1 + 0,0137) \cdot 0,2404 \cdot (T'_{\text{э.}} - 30) + 17,98,^2)$$

откуда

$$T'_{\text{э.}} = 277^{\circ} \text{С.}$$

По формуле (289) мы имели бы:

$$T'_{\text{э.}} \cdot 1,5 = 317 \cdot 1,4 + 0,1 \cdot 30 - \frac{17,98}{0,33 \cdot 4,145},$$

откуда

$$T'_{\text{э.}} = 293^{\circ} \text{С.}$$

За экономайзером имеем:

$$\alpha'_{\text{э.}} = 1,7; \quad (V_{\text{сг.}})''_{\text{э.}} = 6,697; \quad (G_{\text{вл.}})''_{\text{э.}} = 0,7215.$$

<sup>1)</sup> Также как и формула (276) для определения поверхности нагрева пароперегревателя, что указывалось на 144 стр.

<sup>2)</sup> Потеря боровом в окружающую среду

$$Q_3^{\text{бор.}} = 0,005 \cdot 3595 = 17,975 \text{ кал.}$$

Составляя по формулам (290) и (291) два уравнения и решая их, найдем:

$$[(5,887 \cdot 0,3223 + 0,7068 \cdot 0,464) \cdot 277 - (6,697 \cdot 0,3194 + 0,7215 \cdot 0,459) \cdot 180] \cdot 3106 = 12\,000 \cdot (t''_{\text{э.}} - 60) + 0,2 \cdot 5,359 \cdot (1 + 0,0137) \cdot 0,2386 \cdot 3106 \cdot (180 - 30) + 53,93^1) \cdot 3106;$$

$$H_{\text{э.}} \cdot 13 \cdot \left[ \frac{277 + 180}{2} - \frac{t''_{\text{э.}} + 60}{2} \right] = 12\,000 \cdot (t''_{\text{э.}} - 60),$$

откуда

$$t''_{\text{э.}} = 80,5^\circ \text{С} \quad \text{и} \quad H_{\text{э.}} = 121,5 \text{ кв. м.}^2)$$

*Примечание.* Примеры 30 — 33 решены при наличии потерь от химической и механической неполноты сгорания. Если бы сгорание в топке, при том же избытке воздуха, было полным ( $q_3 = q_4 = \text{нулю}$ ), то изменились бы объемы сухих газов, получив следующие значения:

$$\begin{aligned} (V_{\text{сг.}})_{\text{т.}} &= 5,26 \text{ вместо } 5,09 \\ (V_{\text{сг.}})_{\text{к.}} &= 5,67 \quad 5,488 \\ (V_{\text{сг.}})'_{\text{э.}} &= 6,09 \quad 5,887 \\ (V_{\text{сг.}})''_{\text{э.}} &= 6,917 \quad 6,697. \end{aligned}$$

В связи с этим уменьшилась бы теоретическая температура сгорания и увеличилась бы температура в топке:

$$\begin{aligned} T_{\text{г.}} &= 1627 \text{ вместо } 1666 \\ T_{\text{т.}} &= 1263 \quad 1226. \end{aligned}$$

В виду отсутствия потерь от химической и механической неполноты сгорания увеличивается коэффициент полезного действия котельной установки до 80,4% вместо 75,65%, уменьшается расход топлива с 3106 до 2911 кг в час и т. д.

## ГЛАВА ДВАДЦАТЬ СЕДЬМАЯ.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА ЭКОНОМАЙЗЕРА ДЛЯ ПОДОГРЕВА ВОЗДУХА.

В последнее время, с развитием использования для подогрева воды регенеративных циклов, а также вследствие необходимости сжигать очень низкосортное топливо, в стационарных установках все чаще и чаще применяются воздушные экономайзеры. Исполь-

1) Потеря экономайзером тепла в окружающую среду

$$Q_5^{\text{э.}} = 0,015 \cdot 3595 = 53,925 \text{ кал.}$$

2) Что составляет 40,5% от поверхности нагрева котла.

зование тепла уходящих газов на подогрев воздуха не есть новость последнего десятилетия и применяется давно уже во флоте, а также в разного рода производствах, как о том мы уже говорили в сноске на стр. 9.

Расчет поверхности нагрева «воздушного» экономайзера аналогичен расчету поверхности нагрева «водяного» экономайзера. Прежде всего, при наличии промежуточного бора между котлом и экономайзером или между «водяным» и «воздушным» экономайзерами, в зависимости от того, где расположен «воздушный» экономайзер, вычисляют  $T'_в.$  — температуру продуктов сгорания при входе в газоходы «воздушного» экономайзера по формуле (287) или (288), подставляя в них соответственные величины.

А затем решают совместно два уравнения, аналогичных уравнениям (289) или (290):

$$[(G_{пс.} \cdot C_{пс.})'_в. T'_в. - (G_{пс.} \cdot C_{пс.})''_в. T''_в.] \cdot \mu_в. B = L \cdot C \cdot (t_{,,} - t_.) + (\alpha''_в. - \alpha'_в.) G_0 \cdot (1 + \psi) \cdot C \cdot B \cdot (T''_в. - t_в.) + Q_5^в. \cdot B; \quad (294)$$

$$H_в. K_в. \cdot \left[ \frac{T'_в. + T''_в.}{2} - \frac{t_ + t_{,,}}{2} \right] = L \cdot C \cdot (t_{,,} - t_). \quad (295)$$

Левая часть уравнения (294) дает тепло, отданное продуктами сгорания в газоходы «воздушного» экономайзера, при чем коэффициент  $\mu_в.$  учитывает ту долю газов, которая фактически прошла через газоходы «воздушного» экономайзера. Правая часть уравнения (294) учитывает тепло, полезно использованное на нагрев  $L$  кг воздуха в час (первое слагаемое), затем тепло, пошедшее на нагрев воздуха, присосанного в газоходы (второе слагаемое), и тепло, потерянное «воздушным» экономайзером в окружающую среду (третье слагаемое).

Относительно уравнения теплопередачи в «воздушном» экономайзере следует сделать то же указание, что было отмечено нами в конце предыдущей главы XXVI по поводу уравнения (291).<sup>1)</sup>

Величину коэффициента теплопередачи для «воздушного» экономайзера  $K_в.$  можно определить, руководствуясь главой XXI, где изложены основные формулы для расчетов.

Чаще всего встречаются «воздушные» экономайзеры, рассчитываемые на скорость движения воздуха в них от 6 до 10 м/сек.

Увлекаться чрезмерно большими скоростями не следует без

детального экономического расчета с принятием во внимание

<sup>1)</sup> См. стр. 160.

стоимости поверхностей нагрева и расходов в эксплуатации по обслуживанию.

Не надо забывать, что с увеличением скорости возрастает коэффициент теплопередачи, но вместе с тем растут и расходы на преодоление сопротивлений в газоходах и в воздушных каналах.

*Пример 34.* Определить размеры воздушного экономайзера, необходимого для замены водяного экономайзера предыдущей задачи, если температура отходящих газов должна быть сохранена прежней ( $180^{\circ}\text{C}$ ), а весь воздух, подогретый в экономайзере, расходуется для сжигания топлива в топках тех же котлов.

Коэффициент теплопередачи принять равным  $10 \text{ кал/м}^2 \text{ }^{\circ}\text{C час}$ , присос воздуха в газоходы экономайзера равным 0,2, а потерю в окружающую среду 1,5%.

*Решение.* При заданных условиях имеем (см. стр. 142 и 160):

$$\begin{aligned}
 B &= 3106; \quad T_3^{\text{II}} = 277; \quad (V_{\text{сг.}})'_{\text{в.}} = (V_{\text{сг.}})'_{\text{э.}} = 5,887; \\
 (G_{\text{вп.}})'_{\text{в.}} &= (G_{\text{вп.}})'_{\text{э.}} = 0,7068; \quad (V_{\text{сг.}})''_{\text{в.}} = (V_{\text{сг.}})''_{\text{э.}} = 6,697; \\
 (G_{\text{вп.}})''_{\text{в.}} &= (G_{\text{вп.}})''_{\text{э.}} = 0,7215; \quad Q_5^{\text{D.}} = 53,93.
 \end{aligned}$$

По формуле (294) находим температуру воздуха при выходе из экономайзера:

$$\begin{aligned}
 &[(5,887 \cdot 0,3223 + 0,7068 \cdot 0,464) \cdot 277 - (6,697 \cdot 0,3194 + 0,7215 \cdot 0,469) \cdot 180] \times \\
 &\quad \times 3106 = 3106 \cdot 1,3 \cdot 5,359 \cdot (1 + 0,0137) \cdot 0,2386 \cdot (t_{\text{в.}} - 30) + \\
 &\quad + 0,2 \cdot 5,359 \cdot (1 + 0,0137) \cdot 0,2386 \cdot 3106 \cdot (180 - 30) + 53,93 \cdot 3106,
 \end{aligned}$$

откуда

$$t_{\text{в.}} = 77^{\circ}\text{C}.$$

По формуле (295) определяем поверхность нагрева  $H_{\text{в.}}$ :

$$H_{\text{в.}} = 10 \cdot \left[ \frac{277 + 180}{2} - \frac{30 + 77}{2} \right] = 3106 \cdot 1,3 \cdot 5,359 \cdot (1 + 0,0137) \cdot (77 - 30),$$

откуда

$$H_{\text{в.}} = 141 \text{ кв. м.}$$

*Примечание.* При решении этого примера мы воспользовались цифрами температур газов при условии, что для сжигания топлива в топку поступал воздух при температуре  $30^{\circ}\text{C}$  (см. пример 30). При наличии же экономайзера для подогрева воздуха, последний будет при входе в топку иметь температуру больше, чем  $30^{\circ}\text{C}$ . Поэтому следует пересчитать все температуры газов, начиная с температуры горения, и все поверхности нагрева, начиная с первого хода.

НЕ  
УДУНТ  
(ДИТ)

## ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ВОСЬМАЯ.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА ВОДОПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ И ИСПАРИТЕЛЕЙ.**

Под водоподогревателями и испарителями понимаются нагревательные приборы в котельной, получающие тепло не от дымовых газов, а от пара, горячей воды или воздуха.

Мы уже упоминали в главе XVIII о необходимости питать экономайзер для подогрева воды, во избежание его ржавления, водою, предварительно нагретою до температуры не ниже температуры соответствующей точки росы (см. главу XIX). Чтобы удовлетворить этому условию, необходимо при холодной воде ее предварительно подогревать в паровых подогревателях или устраивать особой системы экономайзер непрямого действия (система Шмидта, например),<sup>1)</sup> где нагрев питательной воды происходит в особом водоводяном подогревателе за счет тепла, приносимого водою, совершающей замкнутый круг: «водяной» экономайзер-водоподогреватель — «водяной» экономайзер.

Кроме того мы упоминали о регулировании температуры перегретого пара путем последующего снижения излишков перегрева в особых охладителях пара (см. главу XXIV, стр. 148), что обычно также используется для подогрева воды.<sup>2)</sup>

В последнее десятилетие *в погоне за калориями* многие котельные используют тепло пара при регенеративных циклах также на подогрев воды, иногда до таких пределов, что исчезает даже возможность постановки «водяного» экономайзера.

Наконец, весьма повышенные требования к питательной воде в мощных котельных установках, работающих часто при высоких давлениях и притом с большим напряжением поверхностей нагрева котлов, вызвали распространение испарителей,готавливающих добавочную воду путем ее испарения и последующей конденсации с целью получения чистой воды.

Не исключена также возможность использовать для подогрева питательной воды горячий воздух после электрических генераторов для его обратного вместе с тем охлаждения.

<sup>1)</sup> См. схему такого экономайзера К. В. Кирш. «Атлас котельных установок.» Москва, ноябрь 1915 г., табл. 93.

<sup>2)</sup> Здесь можно упомянуть также о регулировании температуры перегретого пара путем проводки его по трубам, расположенным внутри котла.

Все эти случаи столь разнообразны, что нет возможности все их перечислить, а тем паче для каждого из них приводить расчетные формулы; да в этом нет и надобности, ибо глава XXI о теплопередаче содержит основные формулы и числовые коэффициенты, которыми и можно пользоваться.

Скорость воды, когда последняя течет внутри труб, обычно бывает от 0,01 до 0,05 м/сек и не свыше 1 м/сек; если же вода омывает трубы снаружи и при этом преследуется выделение грязи, то скорость воды должна быть значительно ниже, а именно желательно иметь ее в пределах от 0,001 до 0,003 м/сек.

Следует предупредить, что при желании гарантировать достаточный подогрев воды при непостоянной работе насосов (периодическое питание) необходимо учесть время перерывов в питании и соответственно увеличить расчетную величину.

*Пример 35.* Определить необходимый расход влажного пара, давлением 12 атм. с содержанием влаги 3%, и потребную поверхность нагрева подогревателя для получения воды, нагретой до 60° С, в количестве 12 тонн/час, если в распоряжении имеется вода при температуре 10° С.

*Решение.* Принимая, согласно стр. 118, для сгущающегося водяного пара  $\alpha_1 = 10\,000$  кал/кв. м °С час, для воды при хорошей циркуляции  $\alpha_4 = 4000$  кал/кв. м °С час, получим при железных стенках толщиной 3 мм следующие значения для общего коэффициента теплопередачи от пара к воде (при чистой стенке):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{10\,000} + \frac{0,003}{50} + \frac{1}{4000}} = 2439 \text{ кал/кв. м } ^\circ\text{С час.}$$

Если же принять для воды при плохой циркуляции  $\alpha_4 = 500$  кал/кв. м °С час, то даже при чистой стенке получим:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{10\,000} + \frac{0,003}{50} + \frac{1}{500}} = 463 \text{ кал/кв. м } ^\circ\text{С час.}$$

Влияние циркуляции воды в данном случае весьма существенно, особенно если учесть, что согласно новейшим опытам верхний предел для передачи тепла от конденсирующегося пара через стенку к воде может быть еще увеличен за счет повышения ее циркуляции, как это вытекает из формулы, приведенной в разделе (3) на 120 стр для отдачи тепла стенкой воде при движении ее по трубам.

Принимая  $K = 1200$  кал/кв. м °С час получим поверхность нагрева подогревателя по формуле (266):<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Числитель в этой формуле (см. на след. стр.) = 12 000 · (60 — 10) есть тепло, перешедшее от пара к нагреваемой воде.

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)

$$H_{\text{по.}} = \frac{12\,000 \cdot (60 - 10)}{1200 \cdot (60 - 10)} \ln \frac{190,8 - 10}{190,8 - 60} = 40 \text{ м}^2.$$

Оценивая потерю тепла в окружающую среду в 1% и пользуясь таблицами для водяного пара (см. 207 стр.), получим расход пара при условии полной конденсации его в воду при давлении 12 атм. изб.:

$$\frac{1,01 \cdot 12\,000 \cdot (60 - 10)}{0,97 \cdot 474,1} = 1318 \text{ кг.}$$

При желании охладить конденсат пара с температуры его 190,8° С до любой температуры, более низкой, нужно или увеличить поверхность нагрева только-что рассчитанного подогревателя или поставить второй водоподогреватель. Размер необходимой добавочной поверхности нагрева определяется так, как это было указано в примере 28 (см. 126 стр.).

## ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ДЕВЯТАЯ.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ПИТАТЕЛЬНОГО НАСОСА.

Для подачи воды в котлы, где господствует давление  $P_{\text{к.}}$  кг/см<sup>2</sup> по манометру, необходимо иметь насос, гидравлическая мощность которого определяется по следующей формуле:

$$N_{\text{г.}} = \frac{(10 \cdot P_{\text{к.}} + H) \cdot W}{270\,000}, \quad (296)$$

где:

$N_{\text{г.}}$  — гидравлическая мощность насоса в лош. силах;

$W$  — полный расход воды в кг/час;

$H$  — добавочная высота напора в метрах, преодолеваемая насосом и учитывающая разницу между уровнями воды в котле и в питательном сборном баке, а также и сопротивления водопитательной линии.  $H =$  от 2 до 8 м водяного столба.<sup>1)</sup>

Расход пара на питательный насос колеблется на практике в пределах 40 — 80 килограммов на одну лошадиную силу гидравлической мощности насоса. При плохом надзоре могут быть и значительно большие цифры. В нормальных случаях расход на питательные насосы составляет от 3 до 6% от вырабатываемого

<sup>1)</sup> При неудачных конструкциях водопровода эта величина на практике иногда достигает 2 атм. = 20 м вод. ст.

в котельной количества пара. Столь значительные расходы тепла должны быть снижены путем использования отработавшего в питательных насосах пара на подогрев воды. При поршневых насосах необходимо устанавливать трубчатые подогреватели, чтобы избежать попадания масла в питательную воду.

Желательно пар из насосов предварительно пропускать через маслоотделитель, что способствует лучшей работе подогревателя, так как загрязнение маслом поверхности нагрева снижает коэффициент теплопередачи.

При турбонасосах допускается использование мягкого пара путем непосредственного подогревания им воды в питательном баке.

В первом случае (при поршневом насосе) удастся использовать около 500 калорий тепла на каждый килограмм пара, прошедшего через подогреватель, <sup>1)</sup> а во втором случае (при турбонасосе и непосредственном смешении пара с питательной водой) можно считать около 640 калорий на каждый килограмм пара, отработавшего в турбонасосе.

Температура питательной воды в сборном баке при работе на обратном конденсате, с примесью свежей воды, определяется по правилу смешения жидкостей разных температур и количеств.

При электрифицированном питании мощность электромотора определяется по формуле:

$$N = \frac{N_{г.} \cdot 0,736}{\eta_{п.} \cdot \eta_{пер.} \cdot 10^4} = \frac{7360 \cdot N_{г.}}{\eta_{п.} \cdot \eta_{пер.}}, \quad (297)$$

где:

- $N_{г.}$  — гидравлическая мощность насоса в лощ. силах (см. формулу 296);
- $\eta_{п.}$  — коэффициент полезного действия насоса (%);
- $\eta_{пер.}$  — коэффициент полезного действия передачи (%);
- $N$  — полезная мощность электромотора в киловаттах.

Инж. А. М. Г у к о в с к и й дает следующую таблицу коэффициентов полезного действия для центробежных питательных насосов: <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 500  $\approx$  640 — 95 — 45 при передаче тепла через стенку в трубчатом подогревателе.

<sup>2)</sup> А. М. Г у к о в с к и й. «Котельное хозяйство». Петроград, 1918 г. 9 стр.

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)



ТАБЛИЦА 23.

Диаметр трубы в дюймах.	1½	2½	3	4	5	6	8	10
η <sub>н.</sub> в %.	40	50	55	60	65	70	72	75

При этом А. М. Гукровский рекомендует высчитать мощность самого центробежного насоса, а по ней уже выбирать электромотор со следующим запасом: <sup>1)</sup>

ТАБЛИЦА 24.

Мощность в лош. силах на валу центробежного насоса.	Запас в %.
До одной силы	100
от 1 до 3	50
» 3 » 17	25
17 и больше	15

Мощность на валу центробежного насоса при наших обозначениях определится по формуле:

$$N_{н.} = \frac{100 \cdot N_{г.}}{\eta_{н.}} \quad (298)$$

Вопрос о подогреве воды до экономайзера при электрическом питании, а равно и в случае недостаточного нагрева при паровых насосах, решается установкой специальных паровых водоподогревателей, или же путем специальных устройств, позволяющих к воде, нагнетаемой в экономайзер, подмешивать часть воды, уже подогретой в экономайзере и поступающей в котел.

При точных расчетах необходимо проверять мощность питательного насоса по формулам гидравлики, учитывая потери давления в трубопроводах и все сопротивления на пути движения воды от насоса до момента входа ее в котел.

<sup>1)</sup> Во избежание недоразумений следует указать, что это не есть в сущности запас, а лишь упрощенный подсчет необходимой мощности электромотора, учитывая его эксплуатационные особенности. Требуемый же законом НКГ двойной запас мощности питательных насосов должен быть соблюден особо.

## Г Л А В А Т Р И Д Ц А Т А Я .

### К П О Д С Ч Е Т У Т Я Г И .

Для подсчета размеров дымовой трубы, а также и выбора надлежащего дымососа при искусственной тяге, не достаточно знать объем уходящих газов и их температуру, но необходимо оценить и то разрежение, которое должно быть развито тяговым устройством, или, как говорят, определить сумму всех сопротивлений в газоходах котельной.

Необходимое разрежение у основания дымовой трубы, или создаваемое дымососом, не должно быть меньше:

$$S = S_{\text{т.}} + \Delta S_{\text{к.}} + \Delta S_{\text{пе.}} + \Delta S_{\text{э.}} + \Delta S_{\text{б.}} + \Sigma \Delta S_{\text{р.}}, \quad (299)$$

где:

- $S_{\text{т.}}$  — разрежение в топке (*мм* водяного столба);
- $\Delta S_{\text{к.}}$  — сопротивление в газоходах котла (*мм* водяного столба);
- $\Delta S_{\text{пе.}}$  — сопротивление в газоходах пароперегревателя (*мм* водяного столба);
- $\Delta S_{\text{э.}}$  — сопротивление в газоходах экономайзера (*мм* водяного столба);
- $\Delta S_{\text{б.}}$  — сопротивление в соединительных боровых (*мм* водяного столба);
- $\Sigma \Delta S_{\text{р.}}$  — сумма всех сопротивлений в регистрах (*мм* водяного столба).

Как общее правило, следует помнить, что сопротивления в газоходах изменяются прямо пропорционально квадрату скорости газов.

Скорость газов ( $W_{\text{м/сек.}}$ ) определяется по формуле:

$$W = \frac{V_{\text{сек.}}}{F}, \quad (300)$$

где:

- $F$  — площадь живого сечения газохода (*кв. м*);
- $V_{\text{сек.}}$  — секундный, действительный (не приведенный к нулю) объем газов в куб. метрах, подсчитываемый по формуле:

$$V_{\text{сек.}} = \frac{V_{\text{тб.}} \cdot B}{3600},$$

или на основании формул (102) и (301):

$$V_{\text{сек.}} = \frac{V_{\text{пс.}} \cdot B \cdot (273 + T) \cdot 760}{3600 \cdot 273 \cdot P_{\text{б.}}} = \frac{V_{\text{пс.}} \cdot B \cdot (273 + T) \cdot 760}{982800 \cdot P_{\text{б.}}} = \frac{V_{\text{пс.}} \cdot B \cdot (273 + T)}{1293 \cdot P_{\text{б.}}}, \quad (302)$$

где:

$V_{\text{пс.}}$  — полный объем газов, подсчитанный по составу их в рассматриваемом сечении, приведенный к «нормальному» состоянию и отнесенный к 1 кг сожженного топлива. Подсчет ведется по формуле (99) или (134), в зависимости от того, полное было сгорание в топке или неполное;

$B$  — часовой расход топлива в кг;

$T$  — температура газов в рассматриваемом сечении (°C);

$P_{\text{б.}}$  — барометрическое давление в мм рт. ст.

Из сопоставления формул (300) и (302) с высказанным правилом можно последнее перефразировать так:

Сопротивление газохода при данном живом сечении его прямо пропорционально квадрату действительного объема газов, через него протекающих, а следовательно прямо пропорционально (приблизительно) квадрату коэффициента избытка воздуха в рассматриваемом сечении газохода и количеству сожженного топлива.

Количество сожженного в час топлива до некоторой степени пропорционально напряжению квадратного метра поверхности нагрева котла; поэтому при грубых подсчетах можно для оценки сопротивлений в газоходах котла принять формулу:

$$\Delta S_{\text{к.}} = A \cdot \left( \frac{D}{H_{\text{к.}}} \right)^2 \cdot \alpha_{\text{к.}}^2, \quad (303)$$

где коэфф.  $A$  зависит от типа котла и способа его обмуровки.

В настоящее время мы не имеем надежных данных для расчета сопротивлений в газоходах котла, но для приблизительных соображений можно воспользоваться весьма грубыми цифрами, предложенными проф. Л. К. Рамзиным:

для жаротрубных и горизонтально-водотрубных котлов .

$A = 0,006;$

для комбинированных котлов

$A = 0,009.$

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)

Для вертикально-водотрубных котлов в виду необходимости учесть работу самотяги, сопротивления газоходов котлов определяются по формуле:

$$\Delta S_{\text{к.}} \approx 0,004 \cdot \left( \frac{D}{H_{\text{к.}}} \right)^2 \cdot \alpha_{\text{к.}}^2 - 2. \quad (304)$$

Проф. К. В. Кирш<sup>1)</sup> для подсчета самотяги горячего столба предложил формулу:

$$S_{\text{с.}} = 0,48 \cdot h \cdot \left( \frac{1}{300} - \frac{1}{273 + T} \right) 760, \quad (305)$$

где  $S_{\text{с.}}$  — разница разрежений при высоте горячего столба  $h$  м, создаваемая газами, нагретыми до температуры  $T^{\circ} \text{C}$ .

Сопротивление пароперегревателя зависит от его системы и способа включения, но обычно при нормальной нагрузке можно считать:

$$\Delta S_{\text{пе.}} \text{ от } 1 \text{ до } 2 \text{ мм вод. ст.}$$

Сопротивление, вносимое экономайзером, в сильной степени зависит от системы экономайзеров и от скорости газов в них.

Оценку сопротивления, вносимого экономайзером Каблиц, можно произвести на основании опытов профессора К. В. Кирш,<sup>2)</sup> который нашел для экономайзера Каблица следующие цифры:

При скорости газов . . . = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 м/сек

9 рядов труб, располо-

женных вдоль по-

тока, развивали со-

противления

$$. = 0,5; 0,8; 1,3; 2,1; 3,3; 5 \text{ мм вод. ст.}$$

Для экономайзера Грина проф. В. И. Гриневецкий считал, при скорости газов  $w = 4$  м/сек сопротивление одного ряда труб вдоль потока газов равным 0,1 мм вод. ст.

Сопротивление борова от котла до экономайзера обычно около 0,5 — 1,5 мм вод. ст.; при длинных боровах и в специальных случаях сопротивление борова подсчитывается по формулам течения газов по каналам.

<sup>1)</sup> См. К. В. Кирш. «Дрова как топливо», изд. Теплового комитета при Политехническом о-ве, Москва, 1919 г., стр. 21.

<sup>2)</sup> См. стр. 156, фиг. 14.

Когда имеются подробные чертежи газоходов, то представляется возможным вычислить сопротивления, развивающиеся в них при прохождении продуктов сгорания, пользуясь следующей формулой: <sup>1)</sup>

$$\Delta S = \frac{1,293 \cdot W^2}{2 \cdot g \cdot (1 + 0,00336 \cdot T)} \cdot [\rho \cdot \pi + \Sigma \xi], \quad (306)$$

где:

$\Delta S$  — сопротивление рассчитываемого газохода в *мм* водяного столба;

$W$  — средняя скорость газов, определяемая по формуле (300);

$g$  — ускорение свободно падающего тела, равное в наших широтах 9,81 *м/сек*;

$T$  — средняя температура газов в рассчитываемом газоходе ( $^{\circ}\text{C}$ );

$\rho$  — коэффициент трения, зависящий от характера поверхностей, омываемых газами, и их загрязнения, равный 0,009 — 0,01;

$\pi$  — суммы произведений из длины ( $l$ ) на отношение периметра ( $U$ ) поперечного сечения рассчитываемого газохода к его живой площади ( $F$ ),

т.-е.

$$\pi = l \cdot \frac{U}{F} \quad (307)$$

Когда периметр и сечение рассчитываемого газохода переменны по длине его, то газоход разбивается на отдельные, различной длины, участки 1, 2, 3 и т. д. и величина  $\pi$ , входящая в формулу (302), определяется в этом случае из выражения:

$$\pi = l_1 \cdot \frac{U_1}{F_1} + l_2 \cdot \frac{U_2}{F_2} + l_3 \cdot \frac{U_3}{F_3}, \quad (308)$$

<sup>1)</sup> Эта формула и данные для расчета по ней заимствуются мною из книги инж. И. К. Русвурм. «Круглые дымовые трубы, расчет и сооружение их», изд. 1910 года и отличаются от оригинала (см. формулу 9 на 20 стр. указанной книги) лишь коэффициентом в числителе = 1,293, помощью которого я выразил переход от измерения сопротивления воздушным столбом к измерению его водяным столбом, что обычно и принято на практике, а затем в ней изменены некоторые обозначения для согласования их с принятыми нами ранее.

УДУНТ  
(ДИТ)

где:

$l_1, l_2, l_3$  — суть длины отдельных участков рассчитываемого газохода (в метрах);

$U_1, U_2, U_3$  — периметры его поперечных сечений, омываемые газами (в кв. метрах);

$F_1, F_2, F_3$  — площади поперечных сечений газоходов (в кв. метрах).

Значение величины  $\Sigma \xi$  для каналов, выполненных из кирпичной кладки, И. К. Русвурм считает по Лангу, а именно:

$\xi = 1,5$  — при прямоугольном повороте;

$\xi = 1,0$  — » закругленном »

$\xi = 0,6$  — » колене в  $135^\circ$  »

$\xi = 0,3 - 0,0$  — » постепенных поворотах в зависимости от среднего радиуса закругления;

$\xi = 1,5 - 2,5$  — при крутых поворотах в  $180^\circ$ , в зависимости от степени закругленности поворота;

$\xi = 0,0$  — при открытой заслонке, рама которой скрыта в кирпичной кладке;

$\xi = \left( \frac{F}{F_1 \cdot \varphi} - 1 \right)^2$  — при не вполне закрытой заслонке, так что поперечное свободное сечение пропускного окна  $F$  уменьшается в  $F_1$ . В этой формуле дополнительный коэффициент сжатия  $\varphi = 0,70$ .

Это же значение  $\xi$  принимают при внезапном сужении свободного поперечного сечения жаровых каналов;

$\xi = \left( \frac{F}{F_1} - 1 \right)^2$  — при увеличении свободного поперечного сечения жаровых каналов;

$\xi = 1$  — при  $\frac{F}{F_1}$ , большем двух.

К сожалению, эти данные, весьма ценные при расчете печей специального назначения с длинными газоходами и каналов для подачи воздуха, мало применимы в котельных установках, где главными слагаемыми необходимого разрежения за экономайзером являются сопротивление котла и топки, которые подсчитать по формуле (306) крайне затруднительно.

УДУНТ  
(ДИТ)

Разрежение в топке ( $S_T$  мм вод. ст.) зависит от сопротивления толки ( $\Delta S_T$ ), которое в свою очередь зависит от толщины слоя, напряжения квадр. метра площади колосниковой решетки или зеркала горения, а также в значительной степени от рода топлива и многих других факторов.

При вполне открытых заслонках, регулирующих подачу воздуха в топку, можно считать величину сопротивления в топке  $\Delta S_T$  равной:

ТАБЛИЦА 25.

Сопротивление толки.	$\Delta S_T$ мм вод. ст.
1) Нефтяное топливо .	2 — 3
2) Подмосковный курной уголь, сжигаемый на колосниковой решетке с дутьем, при чистке через 4 — 5 час.	40 — 50
3) Подмосковный курной уголь, на двускатных топках при чистке через 1 — 2 часа .	7 — 8
4) Кусковой антрацит, сжигаемый на колосниковой решетке с дутьем и при чистке через 10 час. .	$m \left( \frac{B/R}{150} \right)^2$

где  $B/R$  — напряжение квадратного метра колосниковой решетки (кг/кв. м в час), а  $m$  — коэфф., величина которого колеблется от 25 до 50 в зависимости от плавкости шлаков и т. п. <sup>1)</sup>

При прочих топливах можно для подсчета  $\Delta S_T$  воспользоваться следующей формулой:

$$\Delta S_T = A_1 \cdot \left[ \frac{B/R}{(\bar{CO}_2)_T} \right]^2, \quad (309)$$

где:

$B/R$  — напряжение квадратного метра площади колосниковой решетки или зеркала горения (кг/кв. м в час), а

$(\bar{CO}_2)_T$  — содержание углекислоты в топочных газах в % по объему сухих газов.

Коэффициент  $A_1$  учитывает род топлива, конструкцию топки и прочие обстоятельства и может быть принят равным:

<sup>1)</sup> Более подробно см. классический труд проф. К. В. Кирш «Антрацит как топливо котельной». Москва, 1915 г.

ТАБЛИЦА 26.

Значение коэффициента $A_1$ в формуле (309).	$A_1$
Каменный уголь ( $Q_{\text{раб.}} \text{ около } 7000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$ ), сжигаемый на колосниках, неспекающийся .	0,03
То же, но уголь спекающийся .	0,05
Торф ( $W \triangleright 30\%$ ), сжигаемый на колосниковой решетке .	0,003
Торф ( $W$ до $50\%$ ), сжигаемый в шахтных топках .	0,007
То же, но при сжигании в шахтно-цепных топках .	0,005
Дрова ( $W \triangleright 35\%$ ), сжигаемые на колосниковой решетке .	0,002
Дрова ( $W \triangleright 45\%$ ), сжигаемые в «горизонтальной» шахте (жаровая труба, сечение которой полностью заполнено в топке дровами) .	0,0015
Дрова ( $W \triangleright 45\%$ ), сжигаемые в шахтных топках нормального типа, с наклонным зеркалом горения .	0,004
Дрова ( $W \triangleright 55\%$ ), сжигаемые в шахтных топках с вертикальным зеркалом горения .	0,0012

При проектировании шахтных топок (особенно высоких) необходимо при нормальной нагрузке иметь разрежение по середине газового окна 4 мм вод. ст. и во всяком случае не менее 3 мм вод. ст., так как при неисполнении этого условия шахта может дымить через загрузочную дверку.

### ГЛАВА ТРИДЦАТЬ ПЕРВАЯ.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ ДЫМОВОЙ ТРУБЫ.

Вопрос о выборе установки, создающей необходимое разрежение за экономайзером для удаления из газоходов отработавших продуктов сгорания, решается на основании экономических подсчетов ее стоимости, учитывая не только капитализационные расходы, но и расходы по обслуживанию.

УДКУНТ  
(ДИТ)



Дымовая труба является одним из старейших сооружений, предназначенных для этой цели, и притом наиболее надежным.

Условия исправной работы дымовой трубы требуют, чтобы скорость выхода газов из трубы не была менее двух метров в секунду, иначе труба не дает тяги — ее не только задувает ветром, но даже при полном отсутствии ветра медленное движение газов внутри трубы создает условия, благоприятствующие образованию обратных внутренних потоков, могущих иногда совершенно приостановить тягу.

Рассчитывать на скорость выше 8 метров точно также не рекомендуется в виду чрезмерного сопротивления, развивающегося при трении дымовых газов о стенки трубы.

Поэтому при расчете площади верхнего сечения дымовых труб в свету рекомендуется задаваться скоростью 3 — 4 м в секунду, с тем расчетом, чтобы при любой возможной нагрузке проектируемой котельной установки скорость газов, покидающих трубу, не выходила из пределов:

$$\text{от двух до восьми метров в секунду} \quad (310)$$

Необходимость удовлетворить условию (310) побуждает при постройке больших котельных устанавливать нередко несколько дымовых труб.

Самый расчет площади верхнего сечения дымовой трубы в свету ведется по формуле (300<sup>1</sup>);

$$F = \frac{V_{\text{сек.}}}{W}, \quad (300^1)$$

где:

$W$  — скорость газов при выходе (желательно 3 — 4 м в секунду);

$V_{\text{сек.}}$  — секундный объем газов, подсчитываемый по формуле (302), при чем температура газов при выходе из трубы ( $T'_{\text{тр.}}$ ) определяется по следующей формуле:

$$(T'_{\text{тр.}} - T''_{\text{тр.}}) \cdot (G_{\text{гс.}} \cdot C_{\text{гс.}})_{\text{г.}} \cdot B = K \cdot \left( \frac{T''_{\text{тр.}} + T'_{\text{тр.}}}{2} - t_{\text{в.}} \right) \cdot \pi \cdot d_{\text{ср.}} \cdot H, \quad (311)$$

где:

$(G_{\text{гс.}} \cdot C_{\text{гс.}})_{\text{г.}}$  — тепло, отдаваемое газами при охлаждении их на 1°С и отнесенное к 1 кг сожженного топлива. Оно вычисляется по составу газов при входе в дымовую трубу, пользуясь формулами (228), (133) и (92);

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)

- V*** — часовой расход топлива в кг;
- d*<sub>ср.</sub>** — средний диаметр дымовой трубы к свету (метры);
- H*** — высота дымовой трубы (метры);
- T*<sub>тр.</sub>** — температура дымовых газов при входе в трубу, которую вычисляют по формуле, аналогичной (287) или (288);
- K*** — коэффициент теплопередачи стенок дымовой трубы. Его можно принять равным для предварительных расчетов согласно таблице 27.

ТАБЛИЦА 27.

Коэффициент теплопередачи стенок дымовой трубы.	Кал/кв. м °С час.
Кирпичная труба.	ок. 1
Бетонная труба (толщиною 100 мм)	ок. 2
Железная нефутерованная труба.	ок. 4

Для более точных расчетов рекомендуется определить общий коэффициент теплопередачи трубы по сложной формуле (242).

Для определения же высоты дымовых труб, измеряемой по вертикали от уровня колосников до верхнего уровня дымовых труб и обозначенной через *H* (в метрах), воспользуемся формулой, основанной на элементарном анализе общеизвестного принципа сообщающихся сосудов.

В самом деле, теоретическая тяга *S'* (мм водяного столба), развиваемая дымовой трубой, может быть выражена следующим равенством:

$$S' = 273 \cdot \left( \frac{\gamma_{в.}}{273 + t} - \frac{\gamma_{г.}}{273 + T} \right) \cdot \frac{P_6}{760} \cdot H, \quad (312)$$

где:

$\gamma_{в.}$  — удельный вес воздуха при температуре 0°С и давлении 760 мм рт. ст.;

$\gamma_{г.}$  — удельный вес газов при тех же условиях (0°С и 760 мм рт. ст.);

А. А. Надежин. Тепловой расчет котельной установки.

- $t$  — средняя температура воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $T$  — » » » газов ( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $P_6$  — барометрическое давление в мм ртутного столба.

Практически можно считать:

$$\gamma_r = \gamma_v = 1,293, \quad (313)$$

что дает:

$$S' = 0,465 \cdot P_6 \cdot H \cdot \left( \frac{1}{273 + t} - \frac{1}{273 + T} \right). \quad (314)$$

Определяемая таким путем тяга  $S'$  (мм вод. ст.) учитывает лишь одну потерю в дымовой трубе, а именно — потерю от охлажденных газов в трубе, но не учитывает затрат тяги:

- 1) на создание скорости газов . . .  $S_w$  мм вод. ст.
- 2) на преодоление сопротивлений при  
течении газов по трубе . . .  $S_r$  мм вод. ст.

Следовательно действительная тяга у основания трубы:

$$S_{\text{тр.}} = S' - S_w - S_r, \quad (315)$$

при чем:

$$S_w = \frac{\gamma_{\text{ср.}} \cdot W_{\text{ср.}}^2}{2 \cdot g} = 0,051 \cdot \gamma_{\text{ср.}} \cdot W_{\text{ср.}}^2, \quad (316)$$

$$S_r = \psi \cdot \frac{\gamma_{\text{ср.}} \cdot W_{\text{ср.}}^2}{d_{\text{ср.}}} \cdot H \dots \quad (317)$$

В формулах (316) и (317) удельный вес газов  $\gamma_{\text{ср.}}$  (кг/куб. м) и скорость их  $W_{\text{ср.}}$  (м/сек) вычисляются по состоянию газов в среднем поперечном сечении трубы; там же берется и диаметр ее  $d_{\text{ср.}}$  в метрах.

Коэффициент  $\psi$  в формуле (317) можно принять в среднем равным 0,0007 для труб диаметром менее 0,5 метра и 0,0006 для труб большего диаметра.

Когда все необходимое разрежение в газоходах должно быть развито за счет дымовой трубы, последняя должна создавать действительную тягу  $S_{\text{тр.}}$  (см. формулу 315), равную или большую необходимого разрежения  $S$  (см. формулу 299), т.-е. должно быть соблюдено неравенство:

$$S_{\text{тр.}} \text{ не может быть меньше } S.$$

НБ  
УДУНТ  
(ДНТ)

## ГЛАВА ТРИДЦАТЬ ВТОРАЯ.

ВЕЛИЧИНЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ РАБОТУ  
КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК.

Для правильного сравнения работы различных котельных между собою полезно пользоваться понятием коэффициента полезного действия нетто, который мы считаем необходимым ввести.

В самом деле, целый ряд котельных, кроме полезно отдаваемого потребителю пара, потребляют также пар на свои собственные, так называемые *служебные нужды*; поэтому для оценки котельной с точки зрения потребителя необходимо знать не ее коэффициент полезного действия брутто, определенный нами в главе XVII и учитывающий все количество пара, выработанного в котельной, т.-е. фактически оценивающий степень использования тепла, располагаемого в горючем (см. формулу 206), но интересно знать ту долю тепла топлива, которая перешла в пар, отданный котельной установкой потребителю.

Для большего уяснения ниже представлена схема теплового баланса котельной установки при часовом расходе топлива  $V$  кг (см. фиг. 16).

Из рассмотрения схемы совершенно очевидно, что потребитель использует не все тепло топлива, перешедшее в пар, а только часть его, равную:

$$[(i_{пе.} \cdot D_{пе.} + i_x \cdot D_{п.}) - t'_{по.} \cdot (D_{пе.} + D_{п.})] \text{ калориям в час. } ^1)$$

Следовательно отношение этого полезно отданного потребителю тепла пара к часовому расходу тепла топлива и даст нам коэффициент полезного действия котельной установки нетто:

$$\eta_{ку. \text{ нетто}} = \frac{i_{пе.} \cdot D_{пе.} + i_x \cdot D_{п.} - (D_{пе.} + D_{п.}) \cdot t'_{по.}}{Q_{раб.} \cdot V} \quad (318)$$

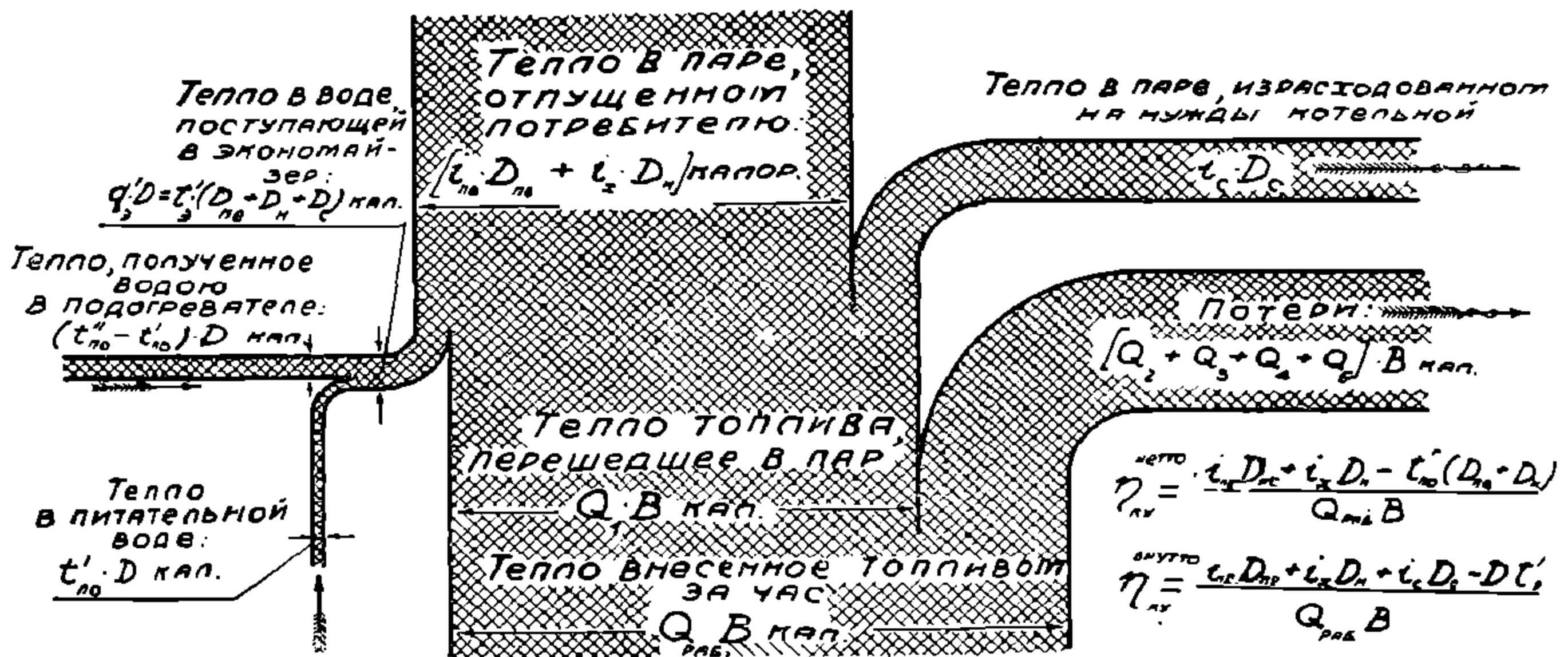
<sup>1)</sup> Здесь рассматривается котельная, отдающая потребителю только пар насыщенный и перегретый. При отпуске потребителю кроме того теплого воздуха в количестве  $L_{п.}$  кг/час при температуре  $t_{п.}$  °С и горячей воды в количестве  $W_{п.}$  кг/час при температуре  $t''_{э.}$  °С, нужно внести соответствующую поправку, а именно прибавить к указанному теплу еще:  $C(1 + \psi) \cdot L_{п.} (t_{п.} - t_{п.}) + W_{п.} \cdot (t''_{э.} - t'_{по.})$  калорий, где  $t_{п.}$  — температура входящего в экономайзер воздуха, а  $t'_{по.}$  — температура воды перед подогревателем (или в питательном баке).

УДМУНТ  
(ДИТ)

Подобную же формулу можно написать и для коэффициента полезного действия котельной установки брутто, а именно: на основании формулы (206) мы имеем:

$$\eta_{\text{брутто к.у.}} = \frac{i_{\text{пе.}} \cdot D_{\text{пе.}} + i_x \cdot D_{\text{н.}} + i_{\text{с.}} \cdot D_{\text{с.}} - (D_{\text{пе.}} + D_{\text{н.}} + D_{\text{с.}}) \cdot t'_z}{Q_{\text{раб.}} \cdot B} \quad (319)$$

Когда котельная не потребляет, в обычных условиях своей работы, пара на служебные нужды ( $D_{\text{с.}} = 0$ ) и всюду пользуется электрической энергией: электронасосы для питания котлов, электромоторы для работы дымососов и вентиляторов, электромотор для движения скребков при экономайзере Грина и т. д., — то в этом



Фиг. 16. Схема теплового баланса котельной установки при часовом расходе топлива  $B$  кг.

случае для определения коэффициента полезного действия ее брутто служит та же формула (319), только в ней нужно положить  $D_{\text{с.}} = 0$ , а для выявления величины коэффициента полезного действия нетто необходимо сделать предварительный подсчет количества тепла пара, за счет которого получена электрическая энергия, потребляемая всеми электромоторами в котельной, и его необходимо вычесть из тепла  $(i_{\text{пе.}} \cdot D_{\text{пе.}} + i_x \cdot D_{\text{н.}})$ , отпущенного котельной потребителю.

Иногда на практике судят о работе котельной по испарительности топлива ( $M$ ), т.-е. по отношению количества испаренной воды котлом к количеству сожженного топлива:

$$M = \frac{D}{B}, \quad (320)$$

где  $D = D_{\text{пе.}} + D_{\text{н.}} + D_{\text{с.}}$ , т.-е. все полученное количество пара в котле.

НВ  
УДУНТ  
(ДИТ)

Ясно, что на величине испарительности весьма сильно будет отражаться не только качество полученного пара (его давление, перегрев), но также температура питательной воды и качество топлива.<sup>1)</sup>

Поэтому величина испарительности топлива, определяемая весьма просто по формуле (320), не может служить не только для сравнения работы различных котельных, но и не всегда дает верную характеристику работы собственной котельной, особенно когда котельная отпускает потребителю переменные количества перегретого и насыщенного пара.

Эта формула подкупает своей простотой и дает возможность быстро иметь представление о работе котельной лишь в тех случаях, когда режим ее мало меняется изо дня в день.

Учитывая условность формулы (320), техники давно уже отметили эту условность, назвав указанную испарительность видимой.

Чтобы дать более верное представление об испарительности топлива данного качества, было введено понятие испарительности топлива по нормальному пару.

Под «нормальным» паром в настоящее время принято понимать пар с теплосодержанием 640 ккал/кг.

Поэтому обозначим испарительность топлива по нормальному пару через  $I_{640}$ . Тогда

$$I_{640} = \frac{i_{пе.} \cdot D_{пе.} + i_x \cdot D_{п.} + i_c \cdot D_c - (D_{пе.} + D_{п.} + D_c) \cdot t'_z}{640 \cdot B} \quad (321)$$

Введенное понятие «испарительность по нормальному пару» дает характеристику котельной лишь для топлива данного качества и в данных условиях эксплуатации. Некоторую поправку можно ввести, различая испарительность брутто и нетто, что не представляет особых затруднений. Формула (321) дает нам испарительность брутто; для испарительности же нетто имеем:

$$(I_{640})_{нетто} = \frac{i_{пе.} \cdot D_{пе.} + i_x \cdot D_{п.} - (D_{пе.} + D_{п.}) \cdot t'_{по.}}{640 \cdot B} \quad (322)$$

Если развить основную мысль, заставившую техников ввести понятие «испарительность топлива по нормальному пару», то, мне

<sup>1)</sup> Кстати отметим, что в числителе (формула 320) фигурирует сумма количеств пара разного теплосодержания.

кажется, было бы полезно установить еще одно понятие «условной испарительности» ( $I_{\text{у.}}$ ).

С легкой руки профессора К. В. Кирш в России привилось понятие «условное топливо», теплотворительность которого принимается 7000 кал/кг, если нет никаких специальных оговорок.

Учитывая это обстоятельство, я и предлагаю ввести понятие «условная испарительность», позволяющее нам сравнивать все котельные между собой, не взирая на чрезвычайное разнообразие в их эксплуатации, при чем я отношу ее к 7000-калорному топливу.

Величина «условной испарительности» определяется по формулам:

$$I_{\text{у.}}^{\text{брутто}} = \frac{i_{\text{пе.}} \cdot D_{\text{пе.}} + i_{\text{x.}} \cdot D_{\text{п.}} + i_{\text{с.}} \cdot D_{\text{с.}} - (D_{\text{пе.}} + D_{\text{в.}} + D_{\text{с.}}) \cdot t'_{\text{э.}}}{640 \cdot B} \cdot \frac{7000}{Q_{\text{раб.}}} =$$

$$= 10,94 \cdot \frac{i_{\text{пе.}} \cdot D_{\text{пе.}} + i_{\text{x.}} \cdot D_{\text{п.}} + i_{\text{с.}} \cdot D_{\text{с.}} - (D_{\text{пе.}} + D_{\text{п.}} + D_{\text{с.}}) \cdot t'_{\text{э.}}}{B \cdot Q_{\text{раб.}}}; \quad (323)$$

$$I_{\text{у.}}^{\text{нетто}} = \frac{i_{\text{пе.}} \cdot D_{\text{пе.}} + i_{\text{x.}} \cdot D_{\text{п.}} - (D_{\text{пе.}} + D_{\text{в.}}) \cdot t'_{\text{по.}}}{640 \cdot B} \cdot \frac{7000}{Q_{\text{раб.}}} =$$

$$= 10,94 \cdot \frac{i_{\text{пе.}} \cdot D_{\text{пе.}} + i_{\text{x.}} \cdot D_{\text{п.}} - (D_{\text{пе.}} + D_{\text{в.}}) \cdot t'_{\text{по.}}}{Q_{\text{раб.}} \cdot B}. \quad (324)$$

Сравнивая формулы (323) и (324), а также формулы (319) и (318), мы имеем соотношения:

$$I_{\text{у.}}^{\text{брутто}} = 10,94 \cdot \eta_{\text{ку.}}^{\text{брутто}}; \quad (325)$$

$$I_{\text{у.}}^{\text{нетто}} = 10,94 \cdot \eta_{\text{ку.}}^{\text{нетто}} \quad (326)$$

Последние две формулы указывают нам, что понятие «условная испарительность» также может служить критерием экономичности котельной, как и понятие «коэффициент полезного действия». <sup>1)</sup>

При правильно спроектированной котельной с мощным экономайзером можно при хороших условиях эксплуатации, даже при низкосортном топливе, иметь коэффициент полезного действия котельной установки (брутто) до 86%, чему отвечает условная испарительность

<sup>1)</sup> Если считать «нормальный» пар с теплосодержанием, равным 637 кал/кг, то в формулах (319), (320), (321) и (322) нужно заменить коэфф. 10,94 цифрой 10,99, ибо  $10,94 \equiv \frac{7000}{640} = 10,9375$ , а  $10,99 \equiv \frac{7000}{637} = 10,989$ .

рительность (брутто) 9,41, а при хорошем топливе этот коэффициент нетрудно поднять до 90%, чему отвечает условная испарительность брутто около 10.

Таблица 28 дает соотношение между указанными величинами.

ТАБЛИЦА 28.

Коэффициент полезного действия	$\eta_{ку.}$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Условная испарительность	$I_{у.}$	5,47	6,56	7,66	8,75	9,85	10,94
Условная испарительность	$I_{у.}$	5	6	7	8	9	10
Коэффициент полезного действия	$\eta_{у.}$	0,457	0,549	0,640	0,731	0,823	0,914

На практике мы часто наблюдаем весьма низкие величины  $\eta_{ку.}^{брутто}$ , спускающиеся в исключительно плохих котельных даже до 30%; наиболее часто встречаемые величины от 50 до 75%, но есть отдельные установки, где  $\eta_{ку.}^{брутто}$  и на практике может быть доведен до указанных мною величин.

Очень часто приходится слышать, что работа котельной характеризуется паронапряжением поверхности нагрева котлов, т.-е. величиною  $\frac{D}{H_{к.}}$ , где  $D$  — полное количество пара (в кг/час), получаемое в котле, а  $H_{к.}$  — поверхность нагрева котла (в кв. м).

Этот метод характеристики работы котельной по напряжению поверхности нагрева котла очень устарел, и в настоящее время, когда целый ряд котельных имеют пароперегреватели и экономайзеры, от него необходимо отказаться.

На крайнюю условность величины  $\frac{D}{H_{к.}}$  указывал еще в 1911 г. профессор К. В. Кирш в своих повторительных лекциях по котельным установкам для инженеров.<sup>1)</sup>

Поэтому в таблице 29 на ряду с цифрами допускаемых паронапряжений поверхности нагрева паровых котлов (кг/м<sup>2</sup> час) приводятся также и цифры теплонапряжений (т кал/м<sup>2</sup> час).

<sup>1)</sup> См. конспект лекций проф. К. В. Кирш, «Котельные установки», изд. 1913 г., стр. 15.



Под теплонпряжением поверхности нагрева понимается число тоннакалорий (тысяч калорий) тепла, проходящих через 1 кв. м в один час. Обозначив это число через  $\boxed{T}$  получим:

$$\boxed{T} = \frac{(i_x - t'_{к.}) D}{1000 \cdot H_{к.}}, \quad (327)$$

где:

$i_x$  — теплосодержание (кал/кг) влажного пара с паросодержанием  $x$  кг/кг;

$t'_{к.}$  — температура воды при входе в котел (°С);

$D$  — все количество пара, даваемое котлом в час (в кг);

$H_{к.}$  — поверхность нагрева котла (в кв. м).

Приводимые в таблице 29 цифры <sup>1)</sup> отнесены мною ко всей поверхности нагрева котла, но, конечно, учитывают неравномерное использование поверхности нагрева, ибо известно, что поверхность, включенная в топочном пространстве, работает во много раз интенсивнее, чем находящаяся в последних ходах. Особенно напряженно работают части поверхности нагрева, получающие тепло лучеиспусканием.

Вспоминая формулу (243) и учитывая фактическую обстановку работы на практике, необходимо предупредить от чрезмерного увлечения высокими цифрами теплонпряжений поверхности нагрева.

ТАБЛИЦА 29.

Типы котлов	Допускаемые величины	
	паронапряжений	теплонпряжений
	поверхности нагрева	
	кг/м <sup>2</sup> час.	тккал/м <sup>2</sup> час.
Цилиндрические .	8— 12	5,1 — 7,7
Батарейные (девятки, шестерки, тройки)	12— 18	7,7 — 11,5
Вертикальные (малой мощности) .	12— 22	7,7 — 14,1

<sup>1)</sup> Проф. А. А. Надежин. «Допустимые паронапряжения поверхностей нагрева паровых котлов». («Вестник инженеров», № 8, август 1925 г., стр. 282.)

Продолжение.

Типы котлов	Допускаемые величины	
	паронапряжений	теплонапряжений
	поверхности нагрева	
	кг/м <sup>2</sup> час.	тккал/м <sup>2</sup> час.
Локомотивные	15—25	9,6—16,0
Жаротрубные	10—30	6,4—19,2
Комбинированные (нижние с жаровыми трубами, верхние с дымогарными).	12—30	7,9—19,2
Паровозные <sup>1)</sup> .	45—60	28,8—38,4
Горизонтально-водотрубные (Шухов, Штейнмюллер, Фицнер-Гампер, Бабкок-Вилькоккс)	12—30	7,7—19,2
Горизонтально-водотрубные судового типа (Бабкок-Вилькоккс)	Не более 45	Не более 29
Вертикально-водотрубные (Гарбе, Борзиг, Ленинградского металлического, Брянского, Луганского и др. заводов)	25—40	16,0—25,6
То же в особо хороших котельных с мощными экономайзерами	До 60 <sup>2)</sup>	До 38,5
Бона-Шнабель.	110—120 <sup>3)</sup>	70,4—76,8
Blomquist (Атмос) <sup>4)</sup>	220	140,8

<sup>1)</sup> Паровозные котлы, примененные в условиях стационарной службы, не могут быть рассчитываемы на столь высокие напряжения, и указанные цифры рекомендуется, в последнем случае, уменьшить по крайней мере в 1½ раза, даже при наличии очень хорошей тяги.

<sup>2)</sup> Автору лично удавалось в подобных условиях получать с 1 кв. м до 80 кг норм. пара в час, но рекомендовать столь высокие цифры для повседневной работы было бы неосмотрительно.

<sup>3)</sup> См. проф. А. П. Гавриленко. «Паровые котлы», издание «Макиз», Москва — Ленинград, 1924 г., стр. 193. Табл. 30.

<sup>4)</sup> См. статью инж. Н. В. Сухарева. «Паровые установки высокого давления» в «Вестнике инженеров» за 1924 г., № 1—2, стр. 47.

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)

Если сделать пересчеты полученных высоких напряжений поверхности нагрева котлов, учитывая также и работу остальных поверхностей нагрева, т.-е. определить отношение всего полученного пара в котле ко всей поверхности нагрева, работающей в котельной, равной сумме поверхностей нагрева котла, перегревателя, экономайзера и водоподогревателя, то мы получим порядок цифр, хорошо знакомый старым практикам, а именно: в большинстве случаев от 8 до 18 кг с квадратного метра суммарной поверхности нагрева в час.

Исключения составляют паровозные котлы в их работе на транспорте, где мы имеем без экономайзера паронапряжение поверхности нагрева котла до 45—60 кг/кв. м час, но это объясняется особыми условиями работы этих котлов.

Еще более разительное увеличение напряженности работы имеют стационарные котлы «Атмос» для очень высокого давления, но их работа существенно отличается от наших обычных условий.

Я сознательно остановился на последнем вопросе о паронапряжении поверхности нагрева котлов, ибо в последнее время эти величины очень часто сообщаются без всяких дополнительных объяснений; без подробных же указаний тех условий, при наличии которых они получены, использовать их разумный техник не может, так как они сами по себе ничего не говорят.

Надежными величинами, действительно характеризующими работу котельной, могут служить коэффициент полезного действия ее брутто и нетто (см. формулы 319 и 318), а также «условная испарительность» (см. формулы 323 и 324), с такой же полнотой характеризующая установку, как и коэффициент полезного действия (см. формулы 325 и 326).

Все остальные величины, приводимые многими исследователями для характеристики работы котельной, являются без подробных пояснений к ним мало показательными, а иногда даже вводят в заблуждение техников, недостаточно владеющих этими специальными понятиями.

*Пример 36.* Определить коэффициент полезного действия котельной установки и условную испарительность топлива для примера 15, если условия сжигания антрацита были таковы, как указано в примере 16, а расход электрической энергии на приведение в действие вспомогательных устройств котельной составил в пересчете на тепло, перешедшее в пар, выработанный котельной, — 6%, не считая тепла пара, расходуемого на форсунки из особого паропровода.

УДУНТ  
(ДИТ)

*Решение.* Расход на служебные нужды в пересчете на тепло пара составил:

$$273^1) + 0,06 \cdot 5937,7^2) = 629,3 \text{ кал.}$$

Следовательно, имеем при холодном дутье и при отпуске на сторону воздуха, нагретого в экономайзере (см. пример 15, стр. 88 и пример 17, стр. 93):

$$\eta_{\text{к.у.}} = \frac{6140,5 - 629,3}{7263} = 0,7588, \text{ или } 75,9\% \text{ (нетто);}$$

$$\eta'_{\text{к.у.}} = \frac{6140,5 - 629,3}{7757} = 0,7105, \text{ или } 71,05\% \text{ (нетто).}$$

При использовании нагретого в экономайзере воздуха на сжигание топлива в топке получим (ср. пример 17, стр. 93).

$$\eta_{\text{к.у.}} = \frac{5937,7^3) - 629,3}{7263} = 0,7309, \text{ или } 73,1\% \text{ (нетто);}$$

$$\eta'_{\text{к.у.}} = \frac{6140,5 - 629,3}{7960} = 0,6924, \text{ или } 69,2\% \text{ (нетто).}$$

Условная испарительность топлива в первом случае (при отдаче на сторону всего воздуха, нагретого в экономайзере):

$$I_{\text{у.}}^{\text{брутто}} = \frac{6140,5}{640} \cdot \frac{7000}{7263} = 9,247;$$

$$I_{\text{у.}}^{\text{нетто}} = \frac{6140,5 - 629,3}{640} \cdot \frac{7000}{7263} = 8,299.$$

Во втором случае, когда воздух, нагретый в экономайзере, поступает в топку котла:

$$I_{\text{у.}}^{\text{брутто}} = \frac{6140,5}{640} \cdot \frac{7000}{7263} = 9,247;$$

$$I_{\text{у.}}^{\text{нетто}} = \frac{5937,7 - 629,3}{640} \cdot \frac{7000}{7263} = 7,994.$$

Все наши рассуждения мы вели в предположении установившегося состояния, т.-е. при наличии справедливости уравнения (1), но, коль скоро отсутствует таковое, вступает в свои права уравнение (3), когда непринятие во внимание последнего члена  $\pm Q_6$  может повести к весьма парадоксальным заключениям. Отличным

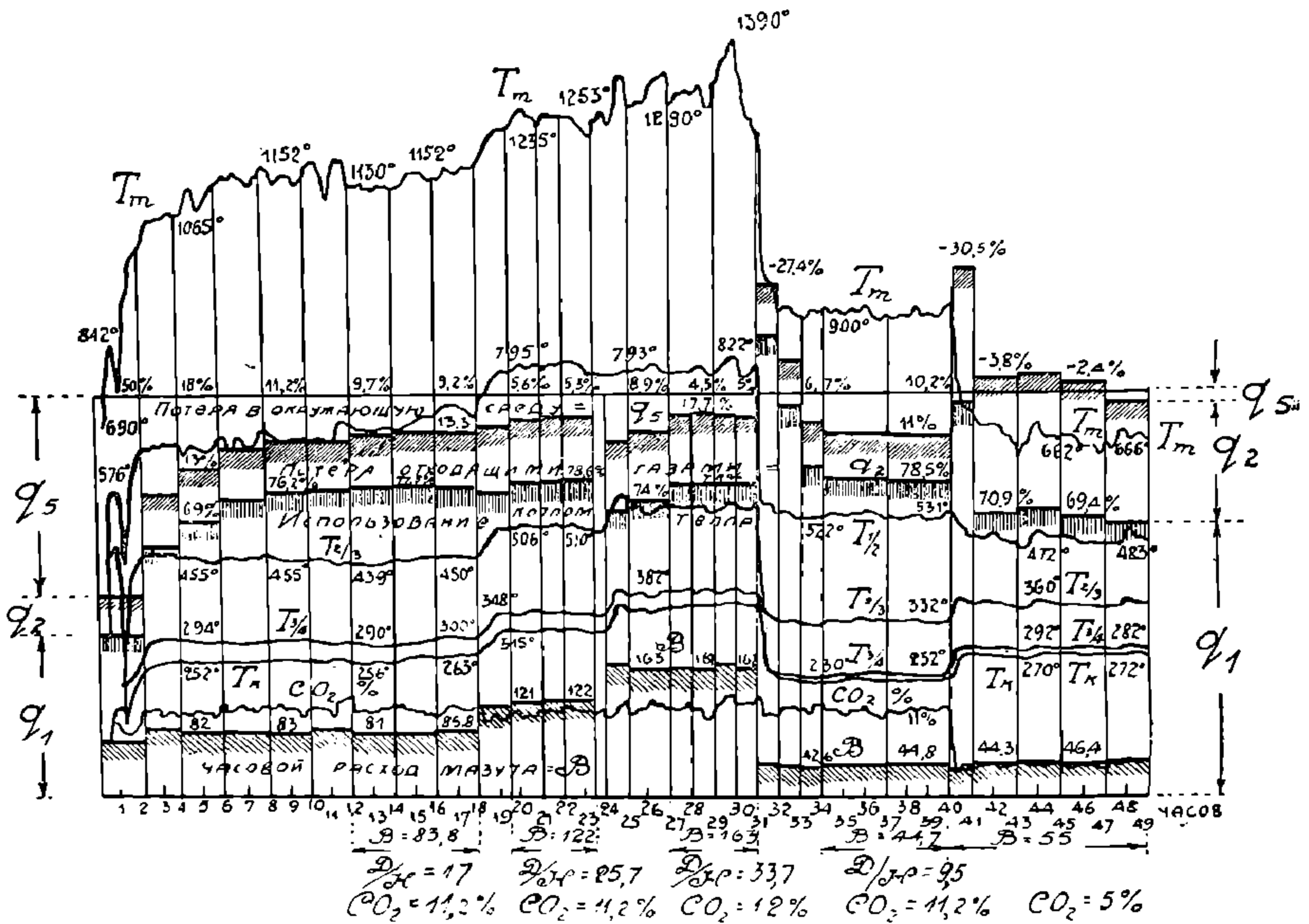
<sup>1)</sup> См. стр. 90. пункт 5 — расход тепла на дутье.

<sup>2)</sup> См. стр. 87,  $Q_1 = Q_1^{\text{к.}} + Q_1^{\text{пе.}} + Q_1^{\text{э.}} = 5937,7$ .

<sup>3)</sup> См. стр. 87.

примером в этом отношении является следующая диаграмма (см. фиг. 17), получившаяся в результате обработки специального опыта, произведенного под руководством И. В. Арбатского и К. В. Кирш в Лаборатории паровых котлов МВТУ с горизонтально-водотрубным котлом 60 кв. м при растопке и при различных условиях его работы. <sup>1)</sup>

Рассмотрение диаграммы указывает, что лишь по истечении 12 часов котел пришел в установившееся тепловое состояние; до этого же времени холодная кладка поглощала тепло на прогрев ее и тем сильно снижала коэффициент полезного действия котла.



Фиг. 17. Диаграмма теплового баланса цельнокамерного парового котла 60 м<sup>2</sup> при переменном режиме его работы по опытам ЛПК МВТУ.

Сравнение опытов за период времени с 12 го до 18-го часа, когда снималось 17 кг пара с 1 кв. м котла в час, и с 20-го до 23-го часа, когда снималось 25,7 кг/кв. м в час, при сохранении прежнего избытка воздуха в топке, показывает, что коэффициент

<sup>1)</sup> К. В. Кирш. «Опыты с корнваллийским и водотрубным котлами при нефтяном отоплении (октябрь—ноябрь 1907 г.)». «Известия механического института МВТУ». Москва, 1909 г., выпуск IV.

УДКУНТ  
(ДИТ)

полезного действия во втором случае несколько возрос: 78,6% вместо 77,5%, при возросшей потере с уходящими газами ( $q_2$ ) и уменьшившейся потере в окружающую среду ( $q_3$ ). Очень характерно, что в период времени с 18-го до 20-го часа коэффициент полезного действия котла несколько снизился за счет потребления тепла топлива кладкой.

Интересно сравнить период времени с 27-го по 31-й час, когда  $\frac{D}{H_{к.}}$  = 33,7 кг/кв. м в час, и период от 34-го до 40-го часа, когда  $\frac{D}{H_{к.}}$  = 9,5 кг/кв. м в час, при сохранении избытка воздуха в топке почти постоянным. Подсчет теплового баланса за час (с 31-го по 32-й) показал избыток полученного тепла над теплом, введенным в топку в количестве 27,4%, т.-е. коэфф. полезного действия по топливу в данном случае получился выше 100%, что объясняется отдачей тепла раскаленной кладкой, которая лишь через три часа пришла в установившееся тепловое состояние, соответствующее новой нагрузке котла.

Изменение избытка воздуха в топке, при том же напряжении поверхности нагрева, дает разительную картину. В первые моменты подсчет теплового баланса указывает на приход тепла сверх полученного в топливе на 30,5% (см. период с 40-го до 41-го часа). Это произошло за счет отдачи тепла кладкой в количестве приблизительно  $30,5 + 10 = 40,5\%$ , вследствие чего коэфф. полезного действия, вместо того чтобы *снизиться*, — как это следовало бы ожидать при увеличении почти в  $2\frac{1}{2}$  раза избытка воздуха, — в первое время после изменения режима работы в топке резко *повысился*, достигнув (98%) за подсчитанный первый час (с 40-го до 41-го часа). Как видно из диаграммы, даже после 9 часов работы котел все еще не пришел в установившееся тепловое состояние.

Все только-что сказанное нужно иметь в виду при производстве испытаний котельных установок и быть крайне осторожным при выводах, учитывая всю сложность обстановки и весьма тесную внутреннюю связь явлений между собой, часто по первому взгляду не в достаточной степени оцениваемых.

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)

## ГЛАВА ТРИДЦАТЬ ТРЕТЬЯ.

## СВОД ГЛАВНЕЙШИХ ФОРМУЛ.

$$Q_{\text{т.}} + Q_{\text{пр.}} = Q_1 + Q_1^{\text{в.}} + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \pm Q_6. \quad (3)$$

$$Q_{\text{раб.}} = 81 \cdot C + 300 \cdot H - 26 \cdot (O - S) - 6 \cdot (9H + W) \quad (5)$$

$$C + H + O + N + S + A + W = 100 \quad (6)$$

$$Q_{\text{раб.}} = \frac{100 - B}{100} Q_{\text{орг.}}^{\text{н.}} + 26 \cdot S - 6 \cdot W \quad (8)$$

$$Q_{\text{орг.}}^{\text{н.}} = 81 \cdot C_0 + 246 \cdot H_0 - 26 \cdot O_0 \quad (9)$$

$$C_0 + H_0 + O_0 + N_0 = 100 \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} C &= C_0 \cdot \frac{100 - B}{100} \\ H &= H_0 \cdot \frac{100 - B}{100} \\ O &= O_0 \cdot \frac{100 - B}{100} \\ N &= N_0 \cdot \frac{100 - B}{100} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$B = A + W + S \quad (12)$$

Для дров сухопутной доставки  $Q_{\text{раб.}} = 4370 - 49,7 \cdot W \dots (13)$

Для дров сплавных  $Q_{\text{раб.}} = 3870 - 44,5 \cdot W \dots (14)$

Для торфа ( $Q_{\text{орг.}}^{\text{н.}} = 5200 \text{ кал/кг}$ ,  $A_{\text{с.}} = 6\%$ )  $Q_{\text{раб.}} = 4888 - 54,9 \cdot W \dots (15)$

Для торфа ( $Q_{\text{орг.}}^{\text{н.}} = 4700 \text{ кал/кг}$ ,  $A_{\text{с.}} = 6\%$ )  $Q_{\text{раб.}} = 4418 - 50,2 \cdot W \dots (16)$

Для антрацита <sup>1)</sup>  $Q_{\text{раб.}} = (100 - B) \cdot 82,5 + 26 \cdot S - 6 \cdot W \quad (328)$

$$C_{\text{w}} = C_{\text{w}_1} \frac{100 - W}{100 - W_1} \quad (17)$$

$$Q^{\text{н.}} = 30,6 \cdot \text{CO} + 26,1 \cdot \text{H}_2 + 86 \cdot \text{CH}_4 + 165 \cdot \text{C}_{\text{н.}} \cdot \text{H}_{\text{т.}} + 55,1 \cdot \text{H}_2\text{S} \quad (20)$$

$$K_0 = 0,01 \cdot \left[ \frac{8}{3} \cdot C + 8 \cdot \left( H - \frac{O}{8} \right) + S \right] \quad (30)$$

$$K_0 = 0,02667 \cdot \epsilon \quad (31)$$

$$\epsilon = C + 3 \cdot \left( H - \frac{O - S}{8} \right) \quad (32)$$

$$V_0 = 3,349 \cdot K_0 \quad (33)$$

<sup>1)</sup> Эта формула предложена проф. К. В. Кирш. См. его великодушную работу «Антрацит как топливо котельных», напечатанную в книге «Донецкий антрацит и техника применения его в промышленности». Харьков, 1915 г.

$$V_0 = 0,08932 \quad (34)$$

$$G_0 = 4,329 \cdot K_0 \quad (35)$$

$$G_0 = 0,1155 \cdot \epsilon \quad (36)$$

$$V_0 = \frac{Q_{\text{раб.}}}{900} = 1,1 \cdot \frac{Q_{\text{раб.}}}{1000} \quad (38)$$

$$G_0 = \frac{Q_{\text{раб.}}}{714} = 1,4 \cdot \frac{Q_{\text{раб.}}}{1000} \quad (39)$$

$$f = \frac{\omega}{100} \cdot F \quad (41)$$

$$P_{\text{впс.}} = \frac{\omega}{100} \cdot P_{\text{вл.}} \quad (42)$$

$$\gamma'_{\text{св.}} = 0,4645 \cdot \frac{B - P_{\text{впс.}}}{273 + t} \quad (43)$$

$$\gamma'_{\text{вл.}} = 0,001 \cdot f \quad (44)$$

$$\gamma'_{\text{вл.}} = 0,2889 \cdot \frac{P_{\text{влс.}}}{(273 + t)} \quad (52)$$

$$\gamma = \gamma'_{\text{св.}} + \gamma'_{\text{вл.}} \quad (45)$$

$$\psi = \frac{\gamma'_{\text{вл.}}}{\gamma'_{\text{св.}}} \quad (47)$$

$$\psi = 0,002153 \cdot \frac{f \cdot (273 + t)}{(B - P_{\text{впс.}})} \quad (48)$$

ПРИ ПОЛНОМ СГОРАНИИ.

$$\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2 = 100 \quad (57)$$

$$\beta = 2,373 \cdot \frac{H - 0,125 \cdot O}{C + 0,375 \cdot S} = 2,373 \cdot \frac{H - \frac{O}{8}}{C + \frac{3}{8} \cdot S} \quad (70)$$

$$\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 = 20,9 - \beta \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2) \quad (72)$$

$$\alpha = \frac{\text{N}_2}{\text{N}_2 - 3,785 \cdot \text{O}_2} \quad (75)$$

ИЛИ

$$\frac{\text{N}_2}{\text{O}_2} = \frac{3,785 \cdot \alpha}{\alpha - 1} \quad (76)$$

$$\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2} = \frac{3 \cdot S}{8 \cdot C} = \frac{0,375 \cdot S}{C} \quad (77)$$

$$\text{CO}_2 = \frac{8 \cdot C}{8 \cdot C + 3 \cdot S} \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2) \quad (77')$$

$$\text{SO}_2 = \frac{3 \cdot S}{8 \cdot C + 3 \cdot S} \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2) \quad (77'')$$

$$(\text{CO}_2 + \text{SO}_2)_{\text{max}} = \frac{20,9}{1 + \beta} \quad (80)$$

УДАЛИТЬ  
(ДИТ)



$$(\text{CO}_2)_{max} = \frac{20,9}{1 + \beta} \cdot \frac{8 \cdot C}{8 \cdot C + 3 \cdot S} \quad (81)$$

$$(\text{SO}_2)_{max} = \frac{20,9}{1 + \beta} \cdot \frac{3 \cdot S}{8 \cdot C + 3 \cdot S} \quad (82)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{\text{CO}_2 + \text{SO}_2} + \mu \quad (89)$$

$$\lambda = \frac{16,53}{0,791 + \beta} \quad (87)$$

$$\mu = \frac{0,209 \cdot \beta}{0,791 + \beta} \quad (88)$$

$$\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{CO} + \text{O}_2 + \text{N}_2 = 100 \quad (103)$$

$$Q_3 = 56,7 \cdot C \cdot \frac{\text{CO}}{\text{CO}_2 + \text{CO}} \quad (110)$$

$$\beta = 2,373 \cdot \frac{H - 0,125 \cdot O}{C + 0,375 \cdot S} = 2,373 \cdot \frac{H - \frac{O}{8}}{C + \frac{3}{8} \cdot S} \quad (70)$$

$$\text{CO} = \frac{Z}{0,6045 + \beta} \quad (124)$$

$$Z = 20,9 - \beta \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2) - (\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2) \quad (125)$$

$$\alpha = \frac{\text{N}_2}{\text{N}_2 - 3,785 \cdot \left( \text{O}_2 - \frac{\text{CO}}{2} \right)} \quad (127)$$

$$\text{SO}_2 = \frac{3 \cdot S}{8 \cdot C} \cdot (\text{CO}_2 + \text{CO}) \quad (130)$$

$$Q_3 = 56,7 \cdot (C + 0,375 \cdot S) \cdot \frac{\text{CO}}{\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{CO}} \quad (131)$$

$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_{\text{раб}}} \cdot 100 \quad (132)$$

$$C_c = C - (C_{\text{ш.л.}} + C_{\text{пр.}} + C_{\text{ув.}}) \quad (100)$$

$$G_{\text{ис.}} = 1 + (1 + \psi) \cdot \alpha \cdot G_0 + W_{\phi} \quad (91)$$

$$G_{\text{вп.}} = 0,01 \cdot (9 \cdot H + W) + W_{\phi} + \psi \cdot \alpha \cdot G_0 \quad (92)$$

$$G_{\text{ср.}} = G_{\text{ис.}} - G_{\text{вп.}} \quad (93)$$

$$V_{\text{вп.}} = \frac{0,01 \cdot (9 \cdot H + W) + W_{\phi} + \psi \cdot \alpha \cdot G_0}{0,8043} \quad (97)$$

$$V_{\text{ср.}} = \frac{C + 0,375 \cdot S}{0,5357 \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{CO})} \quad (133)$$

$$V_{\text{ис.}} = V_{\text{вп.}} + V_{\text{ср.}} = \frac{C + 0,375 \cdot S}{0,5357 \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{CO})} + \frac{0,01 \cdot (9 \cdot H + W) + W_{\phi} + \psi \cdot \alpha \cdot G_0}{0,8043} \quad (134)$$

При наличии в дымовых газах окиси углерода.

При 0° С и 760 мм рт. ст.

НБ  
УДМУТ  
(ДИТ)

$$V_{\text{ТВ.}} = V_{\text{пс.}} \cdot \frac{T + 273}{273} \cdot \frac{760}{P_6} \quad (102)$$

$$q_4 = \frac{100 \cdot Q_4}{Q_{\text{раб.}}} \quad (165)$$

$$Q_4 = 81 \cdot (C_{\text{шл.}} + C_{\text{пр.}} + C_{\text{ун.}}) \quad (166)$$

$$G_4 = \frac{A}{100 - C_4} \quad (168)$$

$$q_5 = \frac{100 \cdot Q_5}{Q_{\text{раб.}}} \quad (177)$$

$$Q_2 = \left[ \frac{C + 0,375 \cdot S}{0,5357 \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{CO})_y} \cdot C_{\text{сг.}} + \left( \frac{9\text{H} + W}{100} + W_{\text{ф.}} + \psi \cdot \alpha \cdot G_0 \right) C_{\text{вп.}} \right] \cdot T_y \quad (192)$$

См. фиг. 5.  $C_{\text{сг.}} = 0,314 + 0,00003 \cdot T \text{ кал/м}^3 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (184)$

$$C_{\text{вп.}} = 0,45 + 0,00005 \cdot T \text{ кал/кг } ^\circ\text{C} \quad (185)$$

$$C_{\text{р.}} = 0,2323 + 0,0000155 \cdot T \text{ кал/кг } ^\circ\text{C}$$

$$C'_{\text{р.}} = 0,3003 + 0,00002001 \cdot T \text{ кал/м}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$C = \frac{C_{\text{р.}} + \psi \cdot C_{\text{вп.}}}{1 + \psi} \quad (200)$$

$$Q_2'' = \left[ \frac{C + 0,375 \cdot S}{0,536 \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{CO})_y} \cdot C_{\text{сг.}} + \left( \frac{9 \cdot \text{H} + W}{100} + \psi \cdot \alpha_y \cdot G_0 \right) \cdot C_{\text{вп.}} \right] \cdot (T_y - t_1) + 0,48 \cdot W_{\text{ф.}} \cdot (T_y - t_{\text{ф.}}) \quad (211)$$

$$Q_1 + Q_1^{\text{в.}} = Q_{\text{т.}} - (Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 - Q_{\text{пр.}}) \quad (208)$$

$$Q_1 + [Q_1^{\text{в.}}]_{\text{п.}} \equiv Q_{\text{раб.}} - (Q_2'' + Q_3 + Q_4 + Q_5) \quad (210')$$

$$\eta_{\text{кв.}} = \frac{Q_1 + [Q_1^{\text{в.}}]_{\text{п.}}}{Q_{\text{раб.}}} = \eta_{\text{кв.}}^{\text{брутто}} \quad (212')$$

$$\eta'_{\text{кв.}} = \frac{Q_1 + Q_1^{\text{в.}}}{Q_{\text{т.}}} \quad (205)$$

$$W_0 = D_{\text{пе.}} + D_x + D_{\text{с.}} + W_{\text{п.}} \quad (193)$$

$$Q_1^{\text{э.}} = \frac{W_0}{B} \cdot (t'_{\text{э.}} - t_{\text{э.}}) \quad (194)$$

$$Q_1^{\text{к.}} = \frac{D_{\text{пе.}} + D_x + D_{\text{с.}}}{B} \cdot (i_x - t'_{\text{к.}}) \quad (195)$$

$$Q_{\text{пе.}} = \frac{D_{\text{пе.}} \cdot (i_{\text{пе.}} - i_x) + D_{\text{с.}} \cdot (i_{\text{с.}} - i_x)}{B} \quad (196)$$

$$Q_1^B = \frac{L}{B} \cdot C \cdot (t_{\text{н}} - t_{\text{с}}) = \frac{L}{B} \frac{C_{\text{р.}} + \psi \cdot C_{\text{вп.}}}{1 + \psi} \cdot (t_{\text{н}} - t_{\text{с}}) \quad (197)$$

$$[Q_1^B] = \frac{L_{\text{п.}}}{B} C \cdot (t_{\text{н}} - t_{\text{с}})$$

$$T_{\text{у.}} = \frac{10^3}{K} \frac{(z + t + r) \cdot a_{\text{э.}}}{b_{\text{т.}} n} + t' \quad (217)$$

$$G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}} = V_{\text{сг.}} C_{\text{сг.}} + G_{\text{вп.}} C_{\text{вп.}} \quad (228)$$

$$T_{\text{г.}} = \frac{Q_{\text{т.}}}{V_{\text{сг.}} C_{\text{сг.}} + G_{\text{вп.}} C_{\text{вп.}}} \quad (229)$$

$$T_{\text{т.}} = 0,01 \cdot \eta_{\text{т.}} \cdot (1 - \delta) \cdot T_{\text{г.}} \quad (268)$$

$$\eta_{\text{т.}} = 100 - (q_3 + q_4 + q_5^{\text{т.}}) \quad (269)$$

$$B = \frac{D_{\text{пе.}} \cdot i_{\text{пе.}} + D_{\text{ж.}} \cdot i_{\text{ж.}} + D_{\text{с.}} \cdot i_{\text{с.}} + W_{\text{п.}} \cdot t_{\text{э.}}'' - W_0 \cdot t_{\text{э.}}' + L \cdot C \cdot (t_{\text{н}} - t_{\text{с}})}{Q_1 + Q_1^B} \quad (275)$$

$$B = \frac{D_{\text{пе.}} \cdot i_{\text{пе.}} + D_{\text{ж.}} \cdot i_{\text{ж.}} + D_{\text{с.}} \cdot i_{\text{с.}} + W_{\text{п.}} \cdot t_{\text{э.}}'' - W_0 \cdot t_{\text{э.}}' + L_{\text{п.}} \cdot C \cdot (t_{\text{н}} - t_{\text{с}})}{Q_1 + (Q_1^B)_{\text{п.}}} \quad (275')$$

При параллельном токе.

$$H = \frac{G_1 C_1 (t_1' - t_1'')}{K (t_1' - t_1'' + t_2' - t_2'')} \cdot \ln \frac{t_1' - t_2'}{t_1'' - t_2''} \quad (259)$$

При противотоке.

$$H = \frac{G_1 C_1 (t_1' - t_1'')}{K (t_1' - t_1'' + t_2' - t_2'')} \cdot \ln \frac{t_1' - t_2''}{t_1'' - t_2'} \quad (260)$$

При постоянной температуре нагреваемого тела.

$$t_2 = \text{const.}$$

$$H = \frac{G_1 \cdot C_1}{K} \cdot \ln \frac{t_1' - t_2}{t_1'' - t_2} \quad (262)$$

При постоянной температуре нагревающего тела.

$$t_1 = \text{const.}$$

$$H = \frac{r_1 G_1}{K \cdot (t_2' - t_2'')} \cdot \ln \frac{t_1 - t_2''}{t_1 - t_2'} = \frac{r_2 G_2}{K \cdot (t_2' - t_2'')} \cdot \ln \frac{t_1 - t_2'}{t_1 - t_2''} \quad (266)$$

При постоянной температуре нагревающего и нагреваемого тела  $t_1 = \text{const.}$  и  $t_2 = \text{const.}$

$$H = \frac{r_1 G_1}{K (t_1 - t_2)} = \frac{r_2 G_2}{K \cdot (t_1 - t_2)} \quad (267)$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_4}} \quad (242)$$

$$\frac{K'}{K''} = \left( \frac{\omega'}{\omega''} \right)^{0,8} \quad (246)$$

$$H_1 = \frac{(G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})_{\text{т.}} \cdot B}{K_1} \cdot \ln \frac{T_{\text{т.}} - t_{\text{н.}}}{T'_{\text{пе.}} - t_{\text{н.}}} \quad (270)$$

$$H_{\text{пе.}} \cdot K_{\text{пе.}} \cdot \left[ \frac{T'_{\text{пе.}} + T''_{\text{пе.}}}{2} - \frac{t_{\text{пе.}} + t_{\text{н.}}}{2} \right] = D \cdot (i_{\text{пе.}} - i_{\text{н.}}) ; \quad (276)$$

$$\begin{aligned} & [(G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})_{\text{т.}} \cdot T'_{\text{пе.}} - (G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})_{\text{к.}} \cdot T''] \cdot B \cdot \mu_{\text{пе.}} = \\ & = D \cdot (i_{\text{пе.}} - i_{\text{x}}) + H_{\text{б.}} \cdot K_{\text{б.}} \cdot \left( \frac{T'_{\text{пе.}} + T''_{\text{пе.}}}{2} - t_{\text{н.}} \right) + \\ & + (\alpha_{\text{к.}} - \alpha_{\text{т.}}) \cdot G_0 \cdot (1 + \psi) \cdot B \cdot C \cdot (T''_{\text{пе.}} - t_{\text{в.}}) + Q_5^{\text{пе.}} \cdot B ; \quad (277) \end{aligned}$$

$$H_2 = H_{\text{к.}} - H_1 \quad (282)$$

$$H_2 = \frac{(G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})_{\text{к.}} \cdot B \cdot (1 - \mu_{\text{пе.}})}{K_2} \cdot \ln \frac{T'_2 - t_{\text{н.}}}{T''_2 - t_{\text{н.}}}, \quad (284)$$

при чем  $T'_2 = T'_{\text{пе.}}$ , а  $T''_2$  не равно  $T_{\text{к.}}$ .

$$T_{\text{к.}} = (1 - \mu_{\text{пе.}}) \cdot T'_2 + \mu_{\text{пе.}} \cdot T''_{\text{пе.}} \quad (285)$$

$$H_2 = \frac{(G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})_{\text{к.}} \cdot B}{K_2} \cdot \ln \frac{T'_2 - t_{\text{н.}}}{T_{\text{к.}} - t_{\text{н.}}} \quad (283')$$

в этом случае все газы идут через 2-й ход, а

$$T'_2 = (1 - \mu_{\text{пе.}}) \cdot T'_{\text{пе.}} + \mu_{\text{пе.}} \cdot T''_{\text{пе.}} \quad (286)$$

$$\begin{aligned} & (G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})_{\text{к.}} \cdot T_{\text{к.}} - (G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})_{\text{э.}} \cdot T'_{\text{э.}} = \\ & = (\alpha'_{\text{э.}} - \alpha_{\text{к.}}) \cdot G_0 \cdot (1 + \psi) \cdot C \cdot (T'_{\text{э.}} - t_{\text{в.}}) + Q_5^{\text{б.}} \quad (288) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & [(G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})_{\text{э.}} \cdot T'_{\text{э.}} - (G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})_{\text{в.}} \cdot T''_{\text{в.}}] \cdot \mu_{\text{э.}} \cdot B = W \cdot (t''_{\text{э.}} - t'_{\text{э.}}) + \\ & + (\alpha''_{\text{э.}} - \alpha'_{\text{э.}}) \cdot G_0 \cdot (1 + \psi) \cdot C \cdot B \cdot (T''_{\text{э.}} - t_{\text{в.}}) + Q_5^{\text{э.}} \cdot B \quad (290) \end{aligned}$$

$$H_{\text{э.}} \cdot K_{\text{э.}} \cdot \left[ \frac{T'_{\text{э.}} + T''_{\text{э.}}}{2} - \frac{t'_{\text{э.}} + t''_{\text{э.}}}{2} \right] = W \cdot (t''_{\text{э.}} - t'_{\text{э.}}) \quad (291)$$

$$\begin{aligned} & (G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})_{\text{I}} \cdot T_{\text{I}} \cdot \mu_{\text{э.}} + (G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})_{\text{II}} \cdot T_{\text{II}} \cdot (1 - \mu_{\text{э.}}) = \\ & = (G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})_{\text{III}} \cdot T_{\text{III}} \quad (292) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & [(G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})_{\text{в.}} \cdot T'_{\text{в.}} - (G_{\text{пс.}} \cdot C_{\text{пс.}})_{\text{н.}} \cdot T''_{\text{н.}}] \cdot \mu_{\text{в.}} \cdot B = L \cdot C \cdot (t''_{\text{н.}} - t_{\text{н.}}) + \\ & + (\alpha''_{\text{в.}} - \alpha'_{\text{в.}}) \cdot G_0 \cdot (1 + \psi) \cdot C \cdot B \cdot (T''_{\text{в.}} - t_{\text{в.}}) + Q_5^{\text{в.}} \cdot B \quad (294) \end{aligned}$$

$$H_{\text{в.}} \cdot K_{\text{в.}} \cdot \left[ \frac{T'_{\text{в.}} + T''_{\text{в.}}}{2} - \frac{t_{\text{н.}} + t''_{\text{н.}}}{2} \right] = L \cdot C \cdot (t''_{\text{н.}} - t_{\text{н.}}) \quad (295)$$

УДУНН  
(ДУНН)

$$N_{\Gamma} = \frac{(10 P_{\kappa} + H) W}{270\,000} \quad (296)$$

$$N_{\text{э.}} = \frac{7360 N_{\Gamma}}{\eta_{\text{н.}} \cdot \eta_{\text{пер.}}} \quad (297)$$

$$N_{\text{н.}} = \frac{100 \cdot N_{\Gamma}}{\eta_{\text{н.}}} \quad (298)$$

$$S = S_{\Gamma} + \Delta S_{\kappa} + \Delta S_{\text{пе.}} + \Delta S_{\text{э.}} + \Delta S_{\text{б.}} + \Sigma \Delta S_{\text{р.}} \quad (299)$$

$$W = \frac{V_{\text{сек.}}}{F} \quad (300)$$

$$V_{\text{сек.}} = \frac{(273 + T) \cdot V_{\text{пс.}}}{982\,800} \cdot \frac{B \cdot 760}{P_{\text{б.}}} = \frac{V_{\text{пс.}} \cdot B \cdot (273 + T)}{1293 P_{\text{б.}}} \quad (302)$$

$$S' = 273 \left( \frac{\gamma_{\text{в.}}}{273 + t} - \frac{\gamma_{\Gamma}}{273 + T} \right) \cdot \frac{P_{\text{б.}}}{760} \cdot H \quad (312)$$

$$\eta_{\text{ку.}}^{\text{брутто}} = \frac{i_{\text{пе.}} D_{\text{пе.}} + i_x \cdot D_{\text{н.}} + i_{\text{с.}} D_{\text{с.}} - (D_{\text{пе.}} + D_{\text{н.}} + D_{\text{с.}}) t'_{\text{э.}}}{Q_{\text{раб.}} B} \quad (319)$$

$$\eta_{\text{ку.}}^{\text{нетто}} = \frac{i_{\text{пе.}} D_{\text{пе.}} + i_x \cdot D_{\text{н.}} - (D_{\text{пе.}} + D_{\text{н.}}) \cdot t'_{\text{по.}}}{Q_{\text{раб.}} \cdot B} \quad (318)$$

$$H = \frac{D}{B} \quad (320)$$

$$H_{640}^{\text{брутто}} = \frac{i_{\text{пе.}} \cdot D_{\text{пе.}} + i_x \cdot D_{\text{н.}} + i_{\text{с.}} D_{\text{с.}} - (D_{\text{пе.}} + D_{\text{н.}} + D_{\text{с.}}) t'_{\text{э.}}}{640 \cdot B} \quad (321)$$

$$H_{640}^{\text{нетто}} = \frac{i_{\text{пе.}} D_{\text{пе.}} + i_x \cdot D_{\text{н.}} - (D_{\text{пе.}} + D_{\text{н.}}) t'_{\text{по.}}}{640 \cdot B} \quad (322)$$

$$H_{\text{у.}}^{\text{брутто}} = \frac{i_{\text{пе.}} \cdot D_{\text{пе.}} + i_x \cdot D_{\text{н.}} + i_{\text{с.}} \cdot D_{\text{с.}} - (D_{\text{пе.}} + D_{\text{н.}} + D_{\text{с.}}) \cdot t'_{\text{э.}}}{640 \cdot B} \cdot \frac{7000}{Q_{\text{раб.}}} \quad (323)$$

$$H_{\text{у.}}^{\text{нетто}} = \frac{i_{\text{пе.}} D_{\text{пе.}} + i_x D_{\text{н.}} - (D_{\text{пе.}} + D_{\text{н.}}) t'_{\text{по.}}}{640 B} \cdot \frac{7000}{Q_{\text{раб}}} \quad (324)$$

$$H_{\text{у.}}^{\text{брутто}} = 10,94 \cdot \eta_{\text{ку.}}^{\text{брутто}} \quad (325)$$

$$H_{\text{у.}}^{\text{нетто}} = 10,94 \cdot \eta_{\text{ку.}}^{\text{нетто}} \quad (326)$$

НБ  
УДУНТ  
(ДІІТ)

## ГЛАВА ТРИДЦАТЬ ЧЕТВЕРТАЯ.

## ПОРЯДОК РАСЧЕТА.

1. Точно договариваются о задании котельной.
2. Выясняются предварительные цифры расхода пара на самообслуживание.
3. Устанавливается расчетная кривая нагрузки в котельной.
4. Выясняется род топлива, его качество и метод сжигания.
5. Вычисляют рабочую теплопроизводительность топлива  $Q_{\text{раб.}}$  и величину его характеристики  $\beta$ .
6. Выбирается тип котлов и намечается их число и мощность. Одновременно намечается и тип топок.
7. Обдумывается экономайзер и взаимное расположение котлов, пароперегревателей и экономайзеров.
8. Рекомендуются сделать предварительный эскиз установки.
9. Обдумывается тип обмуровки и изоляции.
10. Выбираются коэффициенты избытка воздуха, необходимые для подсчета состава газа в топке, за котлом, перед и после экономайзеров и перед дымовой трубой.
11. Оцениваются потери от химической неполноты сгорания  $Q_3$ , от механической неполноты сгорания  $Q_4$  и потери в окружающую среду  $Q_5$ .
12. По выбранным коэффициентам избытка воздуха  $\alpha$  и величине потери от химической неполноты сгорания  $Q_3$  вычисляется состав газов в топке, за котлом, перед и за экономайзером, с учетом потери углерода в шлаках, провале и уносе.
13. Вычисляется температура точки росы.
14. Устанавливается температура воды при входе в экономайзер  $t'_3$  и обдумывается, какими путями нагреть питательную воду до указанной температуры.
15. Задаются температурой уходящих из экономайзера газов  $T'_3$  или  $T''_в$ . (при наличии «воздушного» экономайзера) и определяют потерю с уходящими газами  $Q'_2$ .
16. Вычисляют полезно использованное тепло газов, равное сумме  $Q_1 + Q_1^{\text{в.}}$  или  $Q_1 + (Q_1^{\text{в.}})_п$ .
17. Определяют коэффициент полезного действия котельной установки брутто ( $\eta_{\text{ку}}^{\text{брутто}}$ ).

18. Вычисляют часовой расход топлива на всю котельную и на каждый котел в отдельности.

19. Обдумывают снабжение котельной топливом и возможность удаления шлаков.

20. Вычисляется количество воздуха, необходимое для введения в топку, и обдумывается подвод его к последним.

21. Выясняются предварительные размеры топки и составляется эскиз-чертеж котла (параллельно с и. 23).

22. Определяется теоретическая температура сгорания топлива  $T_r$  при данном коэфф. избытка воздуха в топке и вычисляется температура в топке  $T_{т.}$ , для чего задаются величиной прямой отдачи  $\sigma$ , считаясь с намеченным эскизом топки и ее комбинирования с котлом.

23. Определяется поверхность нагрева первого хода котла  $H_1$ , задаваясь желательной температурой газов перед пароперегревателем  $T'_{пе.}$ , или поверхность нагрева первого хода  $H_1$  определяется на основании конструктивных соображений; в последнем случае по  $H_1$  вычисляется  $T'_{пе.}$  — температура газов при входе в пароперегреватель.

24. Проверяют сечения получающихся газоходов и особенно в наиболее суженных местах, во избежание излишних потерь на тягу и затруднений в эксплуатации.

25. Рассчитывают пароперегреватель, задаваясь величиною  $\mu_{пе.}$  (доля газов, протекающих через пароперегреватель), при наличии регулирующей заслонки в пароперегревателе.<sup>1)</sup> Если пароперегреватель заслонок не имеет, то, полагая  $\mu_{пе.} = 1$ , определяют поверхность нагрева пароперегревателя  $H_{пе.}$  и температуру газов после перегревателя  $T''_{пе.}$  при заданной температуре пара  $t_{пе.}$  для нормальной нагрузки; при недогрузке и перегрузке температура пара  $t_{пе.}$ , конечно, изменяется.

26. При необходимости гарантировать постоянную температуру перегретого пара и наличии регулирующей заслонки — обязательно проверить достаточность поверхности нагрева пароперегревателя  $H_1$  при недогрузке ( $\mu_{пе.}$  не может быть больше единицы).

27. Намечается конструктивное выполнение пароперегревателя и проверяются скорости пара и газов в нем.

<sup>1)</sup> Надо иметь в виду, что при известной уже величине поверхности нагрева пароперегревателя доля газов  $\mu_{пе.}$ , протекающих через пароперегреватель, определяется расчетом.

УДКУНТ  
(ДНТ)

28. Рассчитывают вторые хода котла и определяют температуру газов за котлом  $T_k$ .

29. Определяют температуру газов при входе в экономайзер  $T'_э$ .

30. Рассчитывают экономайзер, т.-е. определяют его поверхность нагрева  $H_э$  и температуру воды при выходе из экономайзера  $t''_э$ .

31. Проверяют скорости газов и воды экономайзера.<sup>1)</sup>

32. Если практически найденная величина поверхности нагрева экономайзера  $H_э$  невыполнима по заводским нормалам, то выбирают наиболее близкий размер  $H_э$  и по нему, зная температуру газов перед экономайзером  $T'_э$  (см. п. 29), определяют температуру газов, уходящих из экономайзера  $T''_э$ .

33. Если предположена установка экономайзера для подогрева воздуха, то, в зависимости от его расположения, за котлом или за экономайзером для подогрева воды, определяют температуру газов  $T'_в$  при входе в «воздушный» экономайзер и рассчитывают его поверхность нагрева.

34. По найденной температуре газов, уходящих из экономайзера  $T''_э$  или  $T'_в$  (при наличии «воздушного» экономайзера) исправляют расчет, начиная с пункта 15.

35. По окончании расчета на нормальную нагрузку, ведут аналогичным же путем расчет на недогрузку и перегрузку, причем уже все размеры поверхностей нагрева являются известными на основании расчета по нормальной нагрузке, а величинами коэффициента избытка воздуха, присосом, прямой отдачей, коэфф. теплопередачи <sup>2)</sup> и потерями задаются на основании опытных данных.

36. Величина недогрузки и перегрузки устанавливается из рассмотрения графика нагрузки котельной. Чаще всего приходится считать на  $\pm 20 - 30\%$  от нормальной.

---

<sup>1)</sup> Рекомендуется также проверить отложение накипи в экономайзере, что особенно важно при ребристых экономайзерах с малой внутренней («водяной») поверхностью нагрева, а также в случае последовательного включения отдельных труб экономайзера любой системы.

<sup>2)</sup> Величины коэффициентов теплопередачи при недогрузке и перегрузке могут быть подсчитаны, учитывая изменения скоростей в газоходах и наличие лучеиспускания в них.



## *ПРИЛОЖЕНИЕ.*

- I. Элементарный химический состав русских топлив.
- II. Важнейшие физические величины.
- III. Теплота сгорания некоторых тел.
- IV—X. Таблицы водяного пара (по W. Schüle). <sup>1)</sup>
- XI. Органическая масса русских топлив.
- XII. Натуральные логарифмы.  
I—S диаграмма.

---

<sup>1)</sup> Prof. Dipl.-Ing. W. Schüle. Technische Thermodynamik. IV Aufl. Berlin, 1923.

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)

ТАБЛИЦА I.

Элементарный состав русских топлив. <sup>1)</sup>

Топливо.	Углерод	Водород	Кислород	Азот	Сера	Зола	Влага	Выход горючих летучих	Q <sub>раб.</sub> ккал/кг
	C	H	O	N	S	A	W		
Дрова	39,09	4,90	33,63	0,78	—	1,6	20	63	3 377
	29,32	3,67	25,22	0,59	—	1,2	40	47	2 382
Торф молодой	39,86	4,51	29,70	1,13	—	4,8	20	56	2 446
	29,9	3,38	22,28	0,84	—	3,6	40	42	2 434
	19,93	2,26	14,85	0,56	—	2,4	60	28	1 424
Торф хороший	43,62	4,51	25,94	1,13	—	4,8	20	53	3 848
	32,71	3,38	19,46	0,85	—	3,6	40	39	2 735
	21,81	2,26	12,97	0,56	—	2,4	60	26	1 625
Бурый уголь	42,51	3,57	14,54	0,98	1,4	7	30	31	3 800
	24,29	2,04	8,31	0,56	0,8	4	60	18	1 914
Каменные угли:									
Пламенный .	70,4	4,93	11,17	1,5	2	5	5	40	6 646
Газовый .	73,04	4,66	8,8	1,5	2	5	5	35	6 856
Кузнечный .	78,32	4,49	3,69	1,5	2	5	5	25	7 374
Коксовый .	80,08	4,4	2,02	1,5	2	5	5	19	7 538
Тощий .	80,96	3,87	1,67	1,5	2	5	5	13	7 488
Антрацит .	85,36	1,76	0,88	—	2	5	5	3,5	7 346
Бокхед (подмосковный).	50,70	5,53	7,67	1,1	4	5	16	52	5 275
Горючие сланцы .	33,74	3,51	8,21	0,14	2,4	32	20	34	3 325
	14,06	1,46	3,42	0,06	1,0	60	20	14	1 315
Мазут (нефт. ост.) .	86,0	12,0	1,65	0,05	S+A+W=0,3			80	9 875

<sup>1)</sup> В основание расчета положен состав органической массы, указанный в таблице XI (см. стр. 212). Состав мазута взят по Д. И. Менделееву.

ТАБЛИЦА II.

## Важнейшие физические величины для газов.

Наименование	Химическое обозначение	Число атомов	Молекулярный вес <sup>1)</sup>	Газовая постоянная	Удельный объем при 0° С и давлении 760 мм рт. ст.	Удельный вес при 0° С и давлении 760 мм рт. ст.	Плотность по отношению к воздуху
Азот . . . . .	N <sub>2</sub>	2	28,016	30,268	$\frac{m^3}{кг}$ 0,7995	$\frac{кг}{м^3}$ 1,2507	0,9673
Азот с аргоном (атмосферный азот) . . . . .	—	—	28,162	30,111	0,7954	1,2572	0,9723
Водород . . . . .	H <sub>2</sub>	2	2,016	420,63	11,1111	0,0900	0,0696
Воздух . . . . .	—	—	28,965	29,276	0,7733	1,293	1,000
Кислород . . . . .	O <sub>2</sub>	2	32,00	26,500	0,7000	1,4286	1,1048
Метан (болотный газ) . . . . .	CH <sub>4</sub>	5	16,032	52,894	1,3972	0,7157	0,5535
Окись углерода . . . . .	CO	2	28,00	30,286	0,8000	1,2500	0,9667
Двуокись углерода (углекислота) . . . . .	CO <sub>2</sub>	3	44,00	19,272	0,5090	1,9643	1,5192
Сернистый ангидрид . . . . .	SO <sub>2</sub>	3	64,07	13,235	0,3496	2,8602	2,2120
Водяной пар сильно перегретый и при очень малых давлениях) . . . . .	H <sub>2</sub> O	3	18,016	47,069	1,2433	0,8043	0,622
Состав сухого воздуха <sup>2)</sup>	Объемный			Весовой			
Атмосферный азот . . . . .	79,1% или кругло 79%			76,9% или кругло 77%			
Кислород . . . . .	20,9% » » 21%			23,1% » » 23%			
Итого . . . . .	100%			100%			

*Примечание.* Атомный вес углерода (С) равен 12; атомный вес серы (S) равен 32,07.

<sup>1)</sup> Атомный вес взят по данным 1925 года из статьи В. Я. Курбатова «Д. И. Менделеев» (см. Журнал химической промышленности. Москва. Сентябрь 1925 г., № 7, стр. 20).

<sup>2)</sup> Проф. А. Н. Реформатский приводит следующий состав воздуха:

а) По объему: азота 78,13%; кислорода 20,90%; аргона 0,94%; углекислого газа 0,03%.

б) По весу: азота 75,55%; кислорода 23,10%; аргона 1,30%; углекислого газа 0,05% (см. А. Реформатский «Неорганическая Химия». Москва, 1917 г., стр. 255).

Проф. В. В. Шарвин указывает следующие цифры:

а) По объему: азота 78%; кислорода 21%; аргона вместе с другими благородными газами около 1%, углекислого газа 0,03% и водорода 0,01%.

б) По весу: азота 75,5%; кислорода 23,15%; аргона вместе с другими благородными газами 1,29%; углекислого газа 0,046%; водорода 0,001% (см. В. В. Шарвин «Введение в Химию». Москва, 1914 г., стр. 173—175).

ТАБЛИЦА III.

Теплота сгорания некоторых тел.

Наименование горючего	Количество горючего.	Формула сгорания	Физическое со- стояние продук- тов сгорания	Количество
				тепла, выделе- мого при сго- рании Кал
Углерод . . . . .	1 кг	$C + O_2 = CO_2$	Газообразное	8 100
Углерод . . . . .	»	$C + \frac{1}{2}O_2 = CO$	»	2 430
Углерод . . . . .	»	$C + 2H_2 = CH_4$	»	1 854
Водород . . . . .	»	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 = H_2O$	»	29 030
Водород . . . . .	»	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 = H_2O$	Жидкое	34 460
Сера . . . . .	»	$S + O_2 = SO_2$	Газообразное	2 165
Окись углерода . . . . .	»	$CO + \frac{1}{2}O_2 = CO_2$	»	2 430
Окись углерода . . . . .	1 куб. м	$CO + \frac{1}{2}O_2 = CO_2$	Газообразное	3 060
Водород . . . . .	»	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 = H_2O$	»	2 610
Водород . . . . .	»	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 = H_2O$	Жидкое	3 090
Метан . . . . .	»	$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	Газообразное	8 600
Этилен . . . . .	»	$C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$	»	14 480
Ацетилен . . . . .	»	$C_2H_2 + \frac{5}{2}O_2 = 2CO_2 + H_2O$	»	16 640
Сернист. водород . . . . .	»	$H_2S + \frac{3}{2}O_2 = S_2O + H_2O$	»	5 510

ТАБЛИЦА IV.

Насыщенный пар от  $-20^\circ$  до  $+9^\circ$  С.

Температура	Давление	Удельный объем	Удельный вес	Температура	Давление	Удельный объем	Удельный вес
$t^\circ$ С	$P_{вл.}$ мм рт. ст.	$V_s.$ $м^3/кг$	$\gamma$ $г/м^3$	$t^\circ$ С	$P_{вл.}$ мм рт. ст.	$V_s.$ $м^3/кг$	$\gamma$ $г/м^3$
- 20	0,960	995	1,00	- 5	3,167	307	3,26
- 19	1,044	920	1,09	- 4	3,413	282	3,55
- 18	1,135	848	1,18	- 3	3,677	262	3,82
- 17	1,233	782	1,28	- 2	3,958	244	4,10
- 16	1,338	722	1,38	- 1	4,258	227	4,40
- 15	1,451	667	1,50	+ 0	4,579	211	4,74
- 14	1,573	615	1,63	+ 1	4,921	198	5,05
- 13	1,705	568	1,76	+ 2	5,286	185	5,41
- 12	1,846	526	1,90	+ 3	5,675	172	5,81
- 11	1,997	486	2,06	+ 4	6,088	161	6,21
- 10	2,159	451	2,22	+ 5	6,528	150	6,67
- 9	2,335	418	2,39	+ 6	6,997	141	7,09
- 8	2,521	388	2,58	+ 7	7,494	132	7,58
- 7	2,722	359	2,78	+ 8	8,023	123	8,13
- 6	2,937	332	3,01	+ 9	8,584	116	8,62

ТАБЛИЦА V.

Насыщенный пар от  $+10^{\circ}$  до  $+50^{\circ}$  С.

Температура	Д а в л е н и е		Удельный объем	Удельный вес	Теплота паро- образования	Полная теп- лота в су- хом паре
	$t^{\circ}$	$P_{\text{вп.}}$ мм рт. ст.				
10	9,21	0,0125	106,4	9,40	589,5	599,5
11	9,84	0,0134	99,7	10,03	589,0	600,0
12	10,52	0,0143	93,7	10,67	588,5	600,5
13	11,23	0,0153	87,9	11,38	588,0	601,0
14	11,99	0,0163	83,0	12,05	587,5	601,5
15	12,79	0,0174	77,9 <sub>5</sub>	12,83	586,9	601,9
16	13,64	0,0186	73,2	13,66	586,4	602,4
17	14,5	0,0197	69,0	14,49	585,9	602,9
18	15,5	0,0211	65,1	15,36	585,4	603,4
19	16,5	0,0224	61,4	16,29	584,9	603,9
20	17,5	0,0238	57,8	17,3	584,3	604,3
21	18,6 <sub>5</sub>	0,0254	54,5	18,3	583,8	604,8
22	19,8	0,0270	51,4	19,4	583,3	605,3
23	21,1	0,0287	48,6	20,6	582,8	605,8
24	22,4	0,0305	45,9	21,8	582,3	606,3
25	23,8	0,0324	43,4	23,0	581,7	606,7
26	25,2	0,0343	41,0	24,4	581,2	607,2
27	26,7	0,0363	38,8	25,8	580,7	607,7
28	28,3 <sub>5</sub>	0,0386	36,8	27,2	580,2	608,2
29	30,0 <sub>5</sub>	0,0408	34,8	28,7	579,7	608,7
30	31,8	0,0432	32,9	30,4	579,2	609,2
31	33,7	0,0458	31,2	32,0	578,7	609,7
32	35,7	0,0486	29,6	33,8	578,2	610,2
33	37,7	0,0513	28,0	35,7	577,7	610,7
34	39,9	0,0543	26,6	37,6	577,2	611,2
35	42,2	0,0573	25,2	39,6	576,6	611,6
36	44,6	0,0606	23,9	41,8	576,1	612,1
37	47,1	0,0641	22,7	44,0	575,6	612,6
38	49,7	0,0676	21,6	46,3	575,1	613,1
39	52,5	0,0715	20,5	48,8	574,6	613,6
40	55,3	0,0752	19,5	51,2	574,0	614,0
41	58,4	0,0795	18,6	53,8	573,5	614,5
42	61,5	0,0836	17,7	56,5	572,9	614,8
43	64,8	0,0882	16,8	59,5	572,4	615,3
44	68,3	0,0930	16,0	62,5	571,8	615,7
45	71,9	0,0978	15,3	65,5	571,3	616,2
46	75,7	0,103	14,6	68,5	570,7	616,6
47	79,6	0,108	13,9	71,9	570,9	617,1
48	83,7	0,114	13,2	75,8	569,6	617,5
49	88,0 <sub>5</sub>	0,120	12,6	79,4	569,1	618,0
50	92,5	0,126	12,0	83,2	568,5	618,4

УДМУНТ  
(ДИТ)

ТАБЛИЦА VI.

Насыщенный пар от 0,02 до 25 абс. кг/см<sup>2</sup>.

Давление	Температура	Удельный объем жид- кости	Удельный объем су- хого пара	Удельный вес сухого пара	Теплота жидкости	Теплота парообразов.	Полная теп- лота в су- хом паре.	Внешняя теплота парообразов.	Внутренняя теплота парообразов.
$P_{abs.}$ кг/см <sup>2</sup>	$t^{\circ}$ С	1000 $\sigma$ л/кг	$V_s$ м <sup>3</sup> /кг	$\gamma_s$ кг/м <sup>3</sup>	$q$ кал/кг	$r$ кал/кг	$q+r=\lambda$ кал/кг	$\Delta p(V_s-\sigma)$ кал/кг	$\rho$ кал/кг
0,02	17,2	1,0013	68,28	0,01465	17,2	586,0	603,2	32,0	554,0
0,04	28,6	1,0040	35,47	0,02819	28,6	580,0	608,6	33,2	546,8
0,06	35,8	1,0063	24,19	0,04134	35,7	576,2	611,9	34,0	542,2
0,08	41,1 <sub>5</sub>	1,0083	18,45	0,05420	41,1	573,4	614,5	34,7	538,7
0,10	45,4	1,0100	14,96	0,06631	45,3	571,4	616,7	35,3	536,1
0,15	53,6	1,0131	10,22	0,09785	53,5	566,6	620,1	36,1	530,5
0,20	59,7	1,0165	7,80	0,1282	59,6	563,1	622,7	36,6	526,5
0,25	64,6	1,0195	6,33	0,1580	64,5	560,1	624,6	37,0	523,1
0,30	68,7	1,0219	5,33	0,1876	68,6	557,9	626,5	37,5	520,4
0,35	72,3	1,0241	4,620	0,2164	72,2	555,7	627,9	37,8	517,9
0,40	75,4	1,0260	4,062	0,2462	75,3	553,9	629,2	38,1	515,8
0,45	78,2	1,0278	3,630	0,2755	78,1	552,2	630,3	38,3	513,9
0,50	80,9	1,0296	3,290	0,3039	80,8	550,4	631,2	38,5	511,9
0,60	85,4 <sub>5</sub>	1,0327	2,775	0,3603	85,4	547,2	632,6	39,0	508,2
0,70	89,4	1,0355	2,400	0,4167	89,4	544,6	634,0	39,3	505,3
0,80	93,0	1,0381	2,115	0,4728	93,0	542,5	635,4	39,6	502,9
0,90	96,2	1,0405	1,900	0,5263	96,2	540,6	636,8	40,0	500,6
1,00	99,1	1,0426	1,721	0,5811	99,1	538,8	637,9	40,3	498,5
1,20	104,2 <sub>5</sub>	1,0467	1,451	0,6892	104,3	535,7	640,0	40,7	495,0
1,40	108,7	1,0503	1,258	0,7949	108,8	532,9	641,7	41,2	491,7
1,60	112,7	1,0535	1,108	0,9025	112,8	530,4	643,2	41,6	488,8
1,80	116,3	1,0563	0,993	1,007	116,5	528,0	644,5	41,9	486,1
2,00	119,6	1,0589	0,902	1,109	119,9	525,7	645,6	42,2	483,5
2,50	126,8	1,0650	0,735	1,361	127,2	520,3	647,5	42,9	477,4
3,00	132,9	1,0705	0,619	1,615	133,4	516,1	649,5	43,4	472,7
3,50	138,2	1,0755	0,5335	1,874	138,7	512,3	651,0	43,7	468,6
4,00	142,9	1,0803	0,4710	2,123	143,8	508,7	652,5	44,1	464,6
4,50	147,2	1,0848	0,4220	2,370	148,1	505,8	653,9	44,4	461,6
5,00	151,1	1,0890	0,3823	2,616	152,0	503,2	655,2	44,7	458,5

УДУНТ  
(ДИТ)

Продолжение.

Давление	Температура	Удельный объем жид- кости	Удельный объем су- хого пара	Удельный вес сухого пара	Теплота жидкости	Теплота парообразов.	Полная теп- лота в су- хом паре	Внешняя теплота парообразов.	Внутренняя теплота парообразов.
$P_{abs.}$ кг/см <sup>2</sup>	° C	1000 $v$ л/кг	$V_s$ м <sup>3</sup> /кг	$\gamma_s$ кг/м <sup>3</sup>	$q$ кал/кг	$r$ кал/кг	$q+r=\lambda$ кал/кг	$Ap(V_s-\sigma)$ кал/кг	$\rho$ кал/кг
5,50	154,7	1,0933	0,3494	2,862	155,7	500,6	656,3	44,9	455,7
6,00	158,1	1,0973	0,3218	3,107	159,3	498,0	657,3	45,1	452,9
6,50	161,2	1,1011	0,2983	3,352	162,4	495,9	658,3	45,3	450,6
7,00	164,2	1,1049	0,2778	3,600	165,5	493,8	659,3	45,5	448,3
7,50	167,0	1,1085	0,2608	3,834	168,5	491,6	660,1	45,7	445,9
8,00	169,6	1,1119	0,2450	4,082	171,2	489,7	660,9	45,8	443,9
8,50	172,2	1,1153	0,2318	4,314	173,9	487,8	661,7	45,9	441,9
9,00	174,6	1,1186	0,2194	4,557	176,4	486,1	662,5	46,0	440,1
9,50	176,9	1,1208	0,2080	4,808	178,6	484,5	663,2	46,1	438,4
10,00	179,1	1,1246	0,1980	5,050	181,2	482,6	663,8	46,2	436,4
10,50	181,2	1,1278	0,1896	5,274	183,3	481,2	664,5	46,4	434,8
11,00	183,2	1,1308	0,1815	5,510	185,4	479,8	665,2	46,5	433,3
11,50	185,2	1,1337	0,1740	5,747	187,5	478,3	665,8	46,6	431,7
12,00	187,1	1,1364	0,1668	5,995	189,5	476,9	666,4	46,6	430,3
12,50	189,0	1,1382	0,1607	6,223	191,6	475,5	667,1	46,7	428,8
13,00	190,8	1,1419	0,1544	6,477	193,4	474,1	667,5	46,8	427,3
13,50	192,5	1,1447	0,1492	6,702	195,2	472,8	668,0	46,9	425,9
14,00	194,2	1,1474	0,1442	6,935	197,0	471,4	668,0	47,0	424,4
14,50	195,8	1,1500	0,1395	7,169	198,7	470,1	668,8	47,1	423,0
15	197,4	1,1525	0,1350	7,407	200,4	468,9	669,3	47,2	421,7
16	200,5	1,156	0,1272	7,862	203,7	466,6	670,3	47,3	419,3
17	203,4	1,163	0,1203	8,312	206,8	464,1	670,9	47,5	416,6
18	206,2	1,167	0,1140	8,772	209,8	461,8	671,6	47,6	414,2
19	208,9	1,171	0,1086	9,208	212,7	459,5	672,2	47,8	411,7
20	211,4 <sub>5</sub>	1,176	0,1035	9,662	215,4	457,4	672,8	47,8	409,6
21	213,9	1,180	0,0985	10,15	218,0	455,3	673,3	47,8	407,5
22	216,3	1,184	0,0942	10,62	220,6	453,3	673,9	47,9	405,4
23	218,6	1,189	0,0901	11,10	223,1	451,4	674,5	47,9	403,5
24	220,8	1,193	0,0864	11,57	225,5	449,5	675,0	47,9	401,6
25	223,0	1,197	0,0829	12,06	227,9	447,7	675,6	47,9	399,8

УДУНТ  
(ДИТ)

ТАБЛИЦА VII.

Насыщенный пар от 0 до 220° С.

Температура	Давление	Удельный объем жид- кости	Удельный объем су- хого пара	Удельный вес сухого пара	Теплота жидкости	Теплота парообразов.	Полная теп- лота в су- хом паре	Внешняя теплота парообразов.	Внутренняя теплота парообразов.
° С	$P_{abs}$ кг/см <sup>2</sup>	1000 $v$ л/кг	$V_s$ м <sup>3</sup> /кг	$\gamma_s$ кг/м <sup>3</sup>	$q$ кал/кг	$r$ кал/кг	$q+r=\lambda$ кал/кг	$\Delta p(V_s - v)$ кал/кг	$\rho$ кал/кг
0	0,00622	1,0001	206,5	0,004843	0,00	594,8	594,8	30,4	564,4
5	0,00889	1,0000	147,1	0,006798	5,03	592,2	597,2	30,6	561,6
10	0,01252	1,0003	106,4	0,009398	10,05	589,5	599,5	31,3	558,2
15	0,0174	1,0009	77,95	0,01283	15,05	586,9	601,9	31,8	555,1
20	0,0238	1,0018	57,81	0,01730	20,05	584,3	604,3	32,3	552,0
25	0,0323	1,0029	43,38	0,02305	25,04	581,7	606,7	32,8	548,9
30	0,0433	1,0043	32,93	0,03037	30,03	579,2	609,2	33,4	545,8
35	0,0573	1,0060	25,24	0,03962	35,0	576,6	611,6	33,9	542,7
40	0,0752	1,0078	19,54	0,05118	39,9	574,0	613,9	34,4	539,6
45	0,0977	1,0098	15,28	0,06545	44,9	571,3	616,2	34,9	536,4
50	0,1258	1,0121	12,02	0,08320	49,9	568,5	618,4	35,4	533,1
55	0,1602	1,0145	9,581	0,10437	54,9	565,7	620,6	36,0	529,7
60	0,2028	1,0167	7,677	0,13026	59,9	562,9	622,8	36,5	526,4
65	0,2547	1,0198	6,200	0,16129	64,9	560,0	624,9	37,0	523,0
70	0,3175	1,0227	5,046	0,1982	69,9	557,1	627,0	37,5	519,6
75	0,3929	1,0258	4,123	0,2425	74,9	554,1	629,0	38,1	516,0
80	0,4827	1,0290	3,406	0,2936	79,9	551,1	631,0	38,6	512,5
85	0,5893	1,0324	2,835	0,3527	84,9	548,0	632,9	39,1	508,9
90	0,7148	1,0359	2,370	0,4219	89,9	545,0	634,9	39,6	505,4
95	0,8619	1,0396	1,988	0,5030	95,0	541,9	636,9	40,2	501,7
100	1,0333	1,0433	1,674	0,5974	100,0	538,7	638,7	40,7	498,0
105	1,2319	1,0473	1,420	0,7042	105,0	535,4	640,4	41,1	494,3
110	1,4608	1,0513	1,210	0,8264	110,1	532,1	642,2	41,5	490,6
115	1,7237	1,0556	1,030	0,9709	115,2	528,7	643,9	41,8	486,9
120	2,0242	1,0592	0,891	1,122	120,2	525,3	645,5	42,2	483,1
125	2,3662	1,0635	0,771	1,297	125,3	521,7	647,0	42,6	479,1
130	2,7538	1,0678	0,668	1,497	130,5	518,2	648,7	43,0	475,2
135	3,1914	1,0725	0,581	1,721	135,6	514,6	650,2	43,3	471,3
140	3,6835	1,0772	0,508	1,968	140,7	510,9	651,6	43,7	467,2
145	4,2352	1,0825	0,446	2,242	145,8	507,4	653,2	44,1	463,3
150	4,8517	1,0878	0,3926	2,547	150,9	503,8	654,7	44,5	459,3
155	5,5373	1,0936	0,3470	2,882	156,1	500,2	656,3	44,8	455,4
160	6,2986	1,0995	0,3074	3,253	161,2	496,6	657,8	45,1	451,5
165	7,1414	1,1060	0,2725	3,670	166,4	493,0	659,4	45,4	447,6
170	8,0714	1,1124	0,2431	4,114	171,6	489,4	661,0	45,7	443,7
175	9,0937	1,1192	0,2170	4,608	176,8	485,8	662,6	46,0	439,8
180	10,215	1,1260	0,1945	5,141	182,0	482,2	664,2	46,2	436,0
185	11,443	1,1334	0,1743	5,737	187,3	478,5	665,8	46,5	432,0
190	12,785	1,1407	0,1574	6,353	192,6	474,7	667,3	46,8	427,9
195	14,246	1,1487	0,1417	7,057	197,8	470,8	668,6	47,0	423,8
200	15,834	1,1566	0,1287	7,770	203,1	467,0	670,1	47,3	419,7
205	17,56	1,165	0,1167	8,569	208,5	462,9	671,4	47,5	415,4
210	19,43	1,173	0,1059	9,443	213,8	458,8	672,6	47,7	411,1
215	21,45	1,182	0,0963	10,38	219,2	454,6	673,8	47,8	406,8
220	23,62	1,191	0,0879	11,38	224,6	450,2	674,8	48,0	402,2

УДАНТ  
(ДИТ)



ТАБЛИЦА VIII.

Насыщенный пар от 20 до 224,2 абс. кг/см<sup>2</sup>.

Давление	Температура	Удельный объем жид- кости	Удельный объем су- хого пара	Удельный вес сухого пара	Теплота жидкости	Теплота парообразов.	Полная теп- лота в су- хом паре	Внешняя теплота па- рообразов.	Внутренняя теплота па- рообразов.
$P_{abs}$ кг/см <sup>2</sup>	° C	1000 $v$ л/кг	$V_s$ м <sup>3</sup> /кг	$\gamma_s$ кг/м <sup>3</sup>	$q$ кал/кг	$r$ кал/кг	$q+r=\lambda$ кал/кг	$\Delta p(V_s - v)$ кал/кг	$\rho$ кал/кг
20	211,5	1,176	0,1035	9,6619	215,4	457	673	47,8	410
21	213,9	1,180	0,0985	10,152	218,0	455	673	47,8	407,5
22	216,3	1,184	0,0942	10,616	220,6	453	674	47,9	405
23	218,6	1,189	0,0901	11,099	223,1	451	674,5	47,9	403,5
24	220,8	1,193	0,0864	11,574	225,5	450	675	47,9	402
25	223,0	1,197	0,0829	12,063	227,9	448	676	47,9	400
26	225,1	1,201	0,0799	12,516	230,1	446	676	47,9	398
27	227,1	1,205	0,0771	12,970	232,3	444,5	677	48,0	396
28	229,1	1,209	0,0744	13,441	234,5	443	677	48,0	395
29	231,0	1,213	0,0719	13,908	236,2	441	678	48,0	393
30	232,9	1,216	0,0696	14,368	238,6	439	678	48,0	391
32	236,5	1,223	0,0653	15,314	242,5	436	679	48,0	388
34	239,9	1,230	0,0615	16,260	246,2	433	679	48,0	385
36	243,1	1,236	0,0582	17,182	249,8	429,5	679	48,0	381,5
38	246,3	1,243	0,0552	18,116	253,3	426	679	48,0	378
40	249,3	1,250	0,0524	19,084	257,0	422,5	680	48,0	374,5
42	252,2	1,256	0,0499	20,040	260,0	419,5	680	47,9	372
44	255,0	1,262	0,0476	21,008	263,0	416,5	680	47,8	369
46	257,7	1,269	0,0456	21,930	266,0	413,5	680	47,7	366
48	260,3	1,275	0,0435	22,988	268,9	410,5	679	47,5	363
50	262,8	1,281	0,0416	24,038	271,8	407,5	679	47,3	360
55	268,8	1,295	0,0377	26,525	279,0	400	679	46,9	353
60	274,5	1,309	0,0346	28,902	285,3	392	677	46,6	345
65	279,7	1,323	0,0316	31,646	291,0	384	675	46,0	338
70	284,7	1,336	0,0290	34,483	297,0	376	673	45,3	331
75	289,4	1,349	0,0267	37,453	302,0	368	670	44,5	323,5
80	293,8	1,362	0,0247	40,486	307,6	360	668	43,7	316
85	298,0	1,373	0,0230	43,478	312,6	352	665	43,0	309
90	302,1	1,388	0,0215	46,512	316,7	344	661	42,3	302
95	306,0	1,403	0,0202	49,505	321,0	336	657,5	41,8	293
100	309,7	1,418	0,0189	52,910	326,4	328	654	41,0	287
110	316,7	1,446	0,0168	59,524	335,6	312	648	39,6	272
120	323,3	1,480	0,0150	66,67	344,6	296	640	38,0	258
130	329,5	1,520	0,0133	75,19	354,0	279	633	36,1	243
140	335,3	1,556	0,0118	84,74	363,6	261	625	33,7	228
150	340,7	1,592	0,0106	94,34	373,8	244	618	31,6	212
160	345,9	1,631	0,0095	105,3	383,6	226	610	29,5	196,5
170	350,9	1,680	0,0085	117,6	393,4	207	601	27,2	180
180	355,6	1,730	0,0076	131,6	403,2	188	591	24,8	163
190	360,2	1,790	0,0067	149,2	414,0	168	582	21,8	146
200	364,4	1,880	0,0059	169,5	425,8	146	572	18,8	127
210	368,5	2,00	0,00507	197,2	441,4	117	558	15,1	102
220	372,4	2,28,5	0,00403	248,1	464,0	69	533	9,0	60
224,2	374,0	2,90	0,00290	344,8	499,3	0	499	0,0	0

УДАЛИТЬ  
(ДИТ)

ТАБЛИЦА IX.

Насыщенный пар от 200 до 374° С.

Температура	Давление	Удельный объем жидкости	Удельный объем сухого пара	Удельный вес сухого пара	Теплота жидкости	Теплота паро- образования	Полная теплота в сухом паре	Внешняя теплота парообразования	Внутренняя теп- лота парообра- зования.
° С	$P_{abs}$ кг/см <sup>2</sup>	1000 $v$ л/кг	$v_s$ м <sup>3</sup> /кг	$\gamma_s$ кг/м <sup>3</sup>	$q$ кал/кг	$r$ кал/кг	$q+r=\lambda$ кал/кг	$Ar(V_s-\sigma)$ кал/кг	$\rho$ кал/кг
200	15,84	1,157	0,1287	7,7700	203,1	467	670	47,3	420
205	17,56	1,165	0,1167	8,5690	208,5	463	671	47,5	415 <sub>5</sub>
210	19,43	1,173	0,1059	9,4428	213,8	459	673	47,7	411
215	21,45	1,182	0,0963	10,384	219,2	455	674	47,8	407
220	23,62	1,191	0,0879	11,377	224,6	451	675	48,0	403
225	25,97	1,201	0,0801	12,484	230,0	446	676	48,0	398
230	28,48	1,211	0,07306	13,687	235,5	442	677 <sub>5</sub>	48,0	394
235	31,18	1,221	0,06705	14,914	240,8	437	678	48,0	389
240	34,08	1,232	0,06140	16,287	246,3	433	679	48,0	385
245	37,17	1,242	0,05650	17,699	251,8	428	680	48,0	380
250	40,48	1,253	0,0519	19,268	257,3	422 <sub>5</sub>	680	48,0	374 <sub>5</sub>
255	44,00	1,263	0,0477	20,964	262,9	417	680	47,8	369
260	47,76	1,275	0,0436	22,936	268,4	411	679	47,5	363 <sub>5</sub>
265	51,75	1,286	0,0402	24,876	273,9	404	678	47,1	357
270	55,99	1,298	0,0370	27,027	279,5	398	677 <sub>5</sub>	46,8	351
275	60,50	1,311	0,0342	29,240	285,2	391	676	46,6	344
280	65,27	1,325	0,0314	31,847	290,9	383	674	46,0	337
285	70,34	1,340	0,0289	34,602	296,5	375	672	45,3	330
290	75,71	1,356	0,0264	37,879	302,3	366	669	44,4	322
295	81,39	1,371	0,0244	40,984	308,1	357	665	43,8	313
300	87,41	1,387	0,0224	44,643	314,0	347	661	42,9	304
305	93,74	1,403	0,0205	48,780	320,2	337	657	41,9	295
310	100,42	1,416	0,0188	53,191	326,3	327	653	40,8	286
315	107,46	1,436	0,0173	57,803	333,5	316	649 <sub>5</sub>	40,0	276
320	114,86	1,457	0,0159	62,893	340,3	304	644	38,9	265
325	122,66	1,485	0,0145	68,96	347,6	291	639	37,3	254
330	130,89	1,515	0,0131	76,33	355,1	277	632	35,6	241
335	139,51	1,550	0,01195	83,68	363,0	262	625	34,0	228
340	148,60	1,585	0,01075	93,02	372,6	246	619	31,9	214
345	158,1	1,622	0,00972	102,9	381,8	228	610	29,8	198
350	168,1	1,667	0,00870	114,9	391,4	210	601	27,7	182
355	178,6	1,712	0,00770	129,9	401,8	191	593	25,0	166
360	189,6	1,793	0,00667	149,9	413,4	168	581	21,8	146
365	201,3	1,891	0,00581	172,1	426,3	143	569	18,5	124
368	208,7	1,980	0,00520	163,4	437,7	122	560	15,8	106
370	213,7	2,061	0,00474	211,0	447,1	103	550	13,4	90
372	218,9	2,205	0,00420	238,1	459,5	79	538	10,2	69
374	224,2	2,900	0,00290	344,8	499,3	0	499	0,0	0

УДАНТ  
(ДИТ)

ТАБЛИЦА X.

Средние удельные теплоемкости между температурами насыщенного и перегретого пара (до 550° C) при давлениях от 0,5 до 30 абс. атм. (кг/см<sup>2</sup>), по О. Knoblauch и Е. Raisch.

$P=atm$	0,5	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
$t_s=^{\circ}C$	80,9	99,1	119,6	142,9	158,1	169,6	179,1	187,1	194,1	200,4	206,1	211,4	216,2	220,8	225,0	229,0	232,8
$t=t_s$	0,479	0,486	0,499	0,525	0,551	0,578	0,605	0,633	0,663	0,694	0,726	0,759	0,794	0,829	0,865	0,902	0,940
$t=120^{\circ}$	473	481															
$140^{\circ}$	471	478	494														
$160^{\circ}$	469	476	490	517													
$180^{\circ}$	468	474	487	512	538	569											
$200^{\circ}$	467	473	485	507	530	556	584	615	653								
$220^{\circ}$	467	473	483	503	524	546	570	596	625	657	692	733	779				
$240^{\circ}$	467	472	482	500	519	539	559	581	605	631	659	689	722	758	799	844	893
$260^{\circ}$	467	472	481	497	515	533	551	570	590	611	635	658	684	712	742	772	806
$280^{\circ}$	468	472	480	496	512	527	544	562	579	597	617	636	658	680	703	727	751
$300^{\circ}$	469	473	480	495	510	524	539	555	570	585	603	619	638	656	675	695	714
$320^{\circ}$	470	473	480	494	508	521	535	548	563	577	592	607	622	638	654	670	686
$340^{\circ}$	470	474	481	493	507	518	532	545	557	570	583	597	610	623	637	651	665
$360^{\circ}$	471	474	481	494	506	516	529	540	552	565	576	588	600	612	624	635	648
$380^{\circ}$	472	475	482	494	505	515	527	538	548	560	570	581					
$400^{\circ}$			483	494	505	514											
$450^{\circ}$			485	495	505	513											
$500^{\circ}$			487	497	505	513											
$550^{\circ}$			490	499	506	513											

\*

ТАБЛИЦА XI.

Состав органической массы русских топлив. <sup>1)</sup>

Т о п л и в о	Органическая масса в % по весу <sup>2)</sup>					Низшая теплопроизводительность органической массы $Q_{орг}^{н.}$ кал/кг
	Углерод	Водород	Кислород	Азот	Выход горючих летучих	
	$C_0$	$H_0$	$O_0$	$N_0$		
Дрова .	49,85	6,25	42,9	1,0	80	4460
Торф молодой .	53	6	39,5	1,5	75	4742
хороший .	58	6	34,5	1,5	70	5277
Бурый уголь .	69	5,8	23,6	1,6	50	6402
Каменные угли:						
Пламенный .	80	5,6	12,7	1,7	45	7527
Газовый .	83	5,3	10	1,7	40	7766
Кузнечный .	89	5,1	4,2	1,7	28	8354
Коксовый .	91	5,0	2,3	1,7	22	8541
Тощий .	92	4,4	1,9	1,7	15	8485
Антрацит	97	2,0	1,0	—	4	8323
Бокхед (подмосковный) .	78	8,5	11,8	1,7	80	8102
Горючие сланцы .	74	7,7	18	0,3	75	7420
Мазут (нефт. остатки) .	86,3	12,0	1,65	0,05	80	9900

<sup>1)</sup> Более подробно см. проф. А. А. Надежин, «Основные виды топлив России и их характеристика», Москва, 1924 г.

<sup>2)</sup> Состав органической массы торфа, бурого угля, антрацита и бокхеда взят по К. В. Кирш, но при подсчете низшей теплопроизводительности органической массы  $Q_{орг}^{н.}$  принято содержание азота в торфе 1,5%, буром угле 1,6%, в антраците = 0 (см. стр. 14).

УДКУНТ  
(ДИТ)

## ТАБЛИЦА XII.

Натуральные логарифмы. <sup>1)</sup>

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	∞	0,0000	0,6931	1,0986	1,3863	1,6094	1,7918	1,9459	2,0794	2,1972
10	2,3026	2,3979	2,4849	2,5649	2,6391	2,7081	2,7726	2,8332	2,8904	2,9444
20	2,9957	3,0445	3,0910	3,1355	3,1781	3,2189	3,2581	3,2958	3,3322	3,3673
30	3,4012	3,4340	3,4657	3,4965	3,5264	3,5553	3,5835	3,6109	3,6376	3,6636
40	3,6889	3,7136	3,7377	3,7612	3,7842	3,8067	3,8286	3,8501	3,8712	3,8918
50	3,9120	3,9318	3,9512	3,9703	3,9890	4,0073	4,0254	4,0431	4,0604	4,0775
60	4,0943	4,1109	4,1271	4,1431	4,1589	4,1744	4,1897	4,2047	4,2195	4,2341
70	4,2485	4,2627	4,2767	4,2905	4,3041	4,3175	4,3307	4,3438	4,3567	4,3694
80	4,3820	4,3944	4,4067	4,4188	4,4308	4,4427	4,4543	4,4659	4,4773	4,4886
90	4,4998	4,5109	4,5218	4,5326	4,5433	4,5539	4,5643	4,5747	4,5850	4,5951
100	4,6052	4,6151	4,6250	4,6347	4,6444	4,6540	4,6634	4,6728	4,6821	4,6913
110	4,7005	4,7095	4,7185	4,7274	4,7362	4,7449	4,7536	4,7622	4,7707	4,7791
120	4,7875	4,7958	4,8040	4,8122	4,8203	4,8283	4,8363	4,8442	4,8520	4,8598
130	4,8675	4,8752	4,8828	4,8903	4,8978	4,9053	4,9127	4,9200	4,9273	4,9345
140	4,9416	4,9488	4,9558	4,9628	4,9698	4,9767	4,9836	4,9904	4,9972	5,0039
150	5,0106	5,0173	5,0239	5,0304	5,0370	5,0434	5,0499	5,0562	5,0626	5,0689
160	5,0752	5,0814	5,0876	5,0938	5,0999	5,1059	5,1120	5,1180	5,1240	5,1299
170	5,1358	5,1417	5,1475	5,1533	5,1591	5,1648	5,1705	5,1761	5,1818	5,1874
180	5,1930	5,1985	5,2040	5,2095	5,2149	5,2204	5,2257	5,2311	5,2364	5,2417
190	5,2470	5,2523	5,2575	5,2627	5,2679	5,2730	5,2781	5,2832	5,2883	5,2933
200	5,2983	5,3033	5,3083	5,3132	5,3181	5,3230	5,3279	5,3327	5,3375	5,3423
210	5,3471	5,3519	5,3566	5,3613	5,3660	5,3706	5,3753	5,3799	5,3845	5,3891
220	5,3936	5,3982	5,4027	5,4072	5,4116	5,4161	5,4205	5,4250	5,4293	5,4337
230	5,4381	5,4424	5,4467	5,4510	5,4553	5,4596	5,4638	5,4681	5,4723	5,4765
240	5,4806	5,4848	5,4889	5,4931	5,4972	5,5013	5,5053	5,5094	5,6134	5,5175
250	5,5215	5,5255	5,5294	5,5334	5,5373	5,5413	5,5452	5,5491	5,5530	5,5568
260	5,5607	5,5645	5,5683	5,5722	5,5759	5,5797	5,5835	5,5872	5,5910	5,5947

<sup>1)</sup> Заимствована из справочной книги по машиностроению Фр. Фрейтага, перевод с немецкого под редакцией И. А. Быкова, С.-Петербург. Изд. 1906 г., стр. 22—23.

УДНБ  
(ДНТ)

Продолжение.

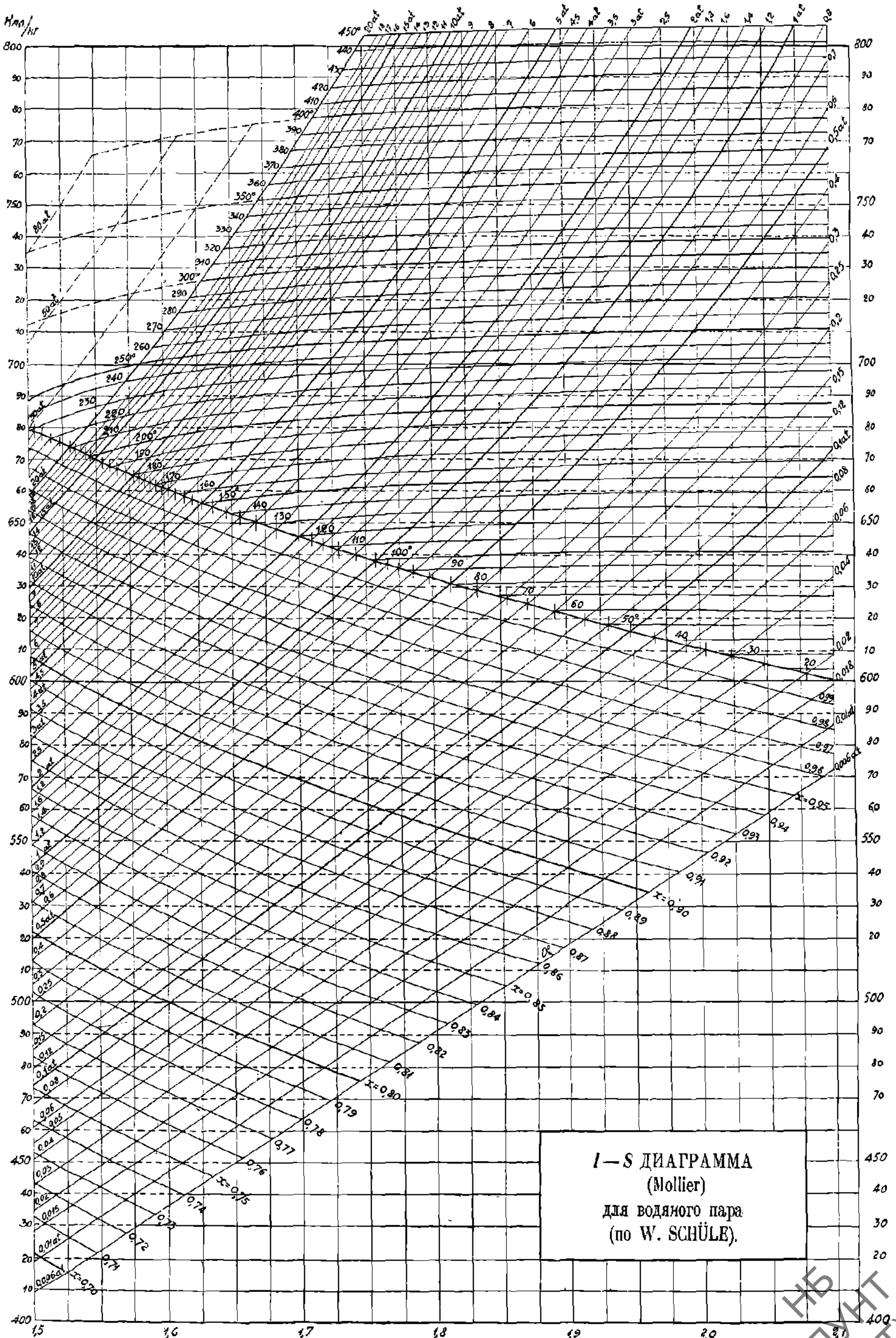
N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
270	5,5984	5,6021	5,6058	5,6095	5,6131	5,6168	5,6204	5,6240	5,6276	5,6312
280	5,6348	5,6384	5,6419	5,6454	5,6490	5,6525	5,6560	5,6595	5,6630	5,6664
290	5,6699	5,6733	5,6768	5,6802	5,6836	5,6870	5,6904	5,6937	5,6971	5,7004
300	5,7038	5,7071	5,7104	5,7137	5,7170	5,7203	5,7236	5,7268	5,7301	5,7333
310	5,7366	5,7398	5,7430	5,7462	5,7494	5,7526	5,7557	5,7589	5,7621	5,7652
320	5,7683	5,7714	5,7746	5,7777	5,7807	5,7838	5,7869	5,7900	5,7930	5,7961
330	5,7991	5,8021	5,8051	5,8081	5,8111	5,8141	5,8171	5,8201	5,8230	5,8260
340	5,8289	5,8319	5,8348	5,8377	5,8406	5,8435	5,8464	5,8493	5,8522	5,8551
350	5,8579	5,8608	5,8636	5,8665	5,8693	5,8721	5,8749	5,8777	5,8805	5,8833
360	5,8861	5,8889	5,8916	5,8944	5,8972	5,8999	5,9026	5,9054	5,9081	5,9011
370	5,9135	5,9162	5,9189	5,9216	5,9243	5,9269	5,9296	5,9322	5,9349	5,9375
380	5,9402	5,9428	5,9454	5,9480	5,9506	5,9532	5,9558	5,9584	5,9610	5,9636
390	5,9661	5,9687	5,9713	5,9738	5,9764	5,9789	5,9814	5,9839	5,9865	5,9890
400	5,9915	5,9940	5,9965	5,9989	6,0014	6,0039	6,0064	6,0088	6,0113	6,0137
410	6,0162	6,0186	6,0210	6,0234	6,0259	6,0283	6,0307	6,0331	6,0355	6,0379
420	6,0403	6,0426	6,0450	6,0474	6,0497	6,0521	6,0544	6,0568	6,0591	6,0615
430	6,0638	6,0661	6,0684	6,0707	6,0730	6,0753	6,0776	6,0799	6,0822	6,0845
440	6,0868	6,0890	6,0913	6,0936	6,0958	6,0981	6,1003	6,1026	6,1048	6,1070
450	6,1092	6,1115	6,1137	6,1159	6,1181	6,1203	6,1225	6,1247	6,1269	6,1291
460	6,1312	6,1334	6,1356	6,1377	6,1399	6,1420	6,1442	6,1463	6,1485	6,1506
470	6,1527	6,1549	6,1570	6,1591	6,1612	6,1633	6,1654	6,1675	6,1696	6,1717
480	6,1738	6,1759	6,1779	6,1800	6,1821	6,1841	6,1862	6,1883	6,1903	6,1924
490	6,1944	6,1964	6,1985	6,2005	6,2025	6,2046	6,2066	6,2086	6,2106	6,2126
500	6,2146	6,2166	6,2186	6,2206	6,2226	6,2246	6,2265	6,2285	6,2305	6,2324
510	6,2344	6,2364	6,2383	6,2403	6,2422	6,2442	6,2461	6,2480	6,2500	6,2519
520	6,2538	6,2558	6,2577	6,2596	6,2615	6,2634	6,2653	6,2672	6,2691	6,2710
530	6,2729	6,2748	6,2766	6,2785	6,2804	6,2823	6,2841	6,2860	6,2879	6,2897
540	6,2916	6,2934	6,2953	6,2971	6,2989	6,3008	6,3026	6,3044	6,3063	6,3081
550	6,3099	6,3117	6,3135	6,3154	6,3172	6,3190	6,3208	6,3226	6,3244	6,3261
560	6,3279	6,3297	6,3315	6,3333	6,3351	6,3368	6,3386	6,3404	6,3421	6,3439
570	6,3456	6,3474	6,3491	6,3509	6,3526	6,3544	6,3561	6,3578	6,3596	6,3613
580	6,3630	6,3648	6,3665	6,3682	6,3699	6,3716	6,3733	6,3750	6,3767	6,3784
590	6,3801	6,3818	6,3835	6,3852	6,3869	6,3886	6,3902	6,3919	6,3936	6,3953

Продолжение.

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
600	6,3969	6,3986	6,4003	6,4019	6,4036	6,4052	6,4069	6,4085	6,4102	6,4118
610	6,4135	6,4151	6,4167	6,4184	6,4200	6,4216	6,4232	6,4249	6,4265	6,4281
620	6,4297	6,4313	6,4329	6,4345	6,4362	6,4378	6,4394	6,4409	6,4425	6,4441
630	6,4457	6,4473	6,4489	6,4505	6,4520	6,4536	6,4552	6,4568	6,4583	6,4599
640	6,4615	6,4630	6,4646	6,4661	6,4677	6,4693	6,4708	6,4723	6,4739	6,4754
650	6,4770	6,4785	6,4800	6,4816	6,4831	6,4846	6,4862	6,4877	6,4892	6,4907
660	6,4922	6,4938	6,4953	6,4968	6,4983	6,4998	6,5013	6,5028	6,5043	6,5058
670	6,5073	6,5088	6,5103	6,5117	6,5132	6,5147	6,5162	6,5177	6,5191	6,5206
680	6,5221	6,5236	6,5250	6,5265	6,5280	6,5294	6,5309	6,5323	6,5338	6,5352
690	6,5367	6,5381	6,5396	6,5410	6,5425	6,5439	6,5453	6,5468	6,5482	6,5497
700	6,5511	6,5525	6,5539	6,5554	6,5568	6,5582	6,5596	6,5610	6,5624	6,5639
710	6,5653	6,5667	6,5681	6,5695	6,5709	6,5723	6,5737	6,5751	6,5765	6,5779
720	6,5793	6,5806	6,5820	6,5834	6,5848	6,5862	6,5876	6,5889	6,5903	6,5917
730	6,5930	6,5944	6,5958	6,5971	6,5985	6,5999	6,6012	6,6026	6,6039	6,6053
740	6,6067	6,6080	6,6093	6,6107	6,6120	6,6134	6,6147	6,6161	6,6174	6,6187
750	6,6201	6,6214	6,6227	6,6241	6,6254	6,6267	6,6280	6,6294	6,6307	6,6320
760	6,6333	6,6346	6,6359	6,6373	6,6386	6,6399	6,6412	6,6425	6,6438	6,6451
770	6,6464	6,6477	6,6490	6,6503	6,6516	6,6529	6,6542	6,6554	6,6567	6,6580
780	6,6593	6,6606	6,6619	6,6631	6,6644	6,6657	6,6670	6,6682	6,6695	6,6708
790	6,6720	6,6733	6,6746	6,6758	6,6771	6,6783	6,6796	6,6809	6,6821	6,6834
800	6,6846	6,6859	6,6871	6,6884	6,6896	6,6908	6,6921	6,6933	6,6946	6,6958
810	6,6970	6,6983	6,6995	6,7007	6,7020	6,7032	6,7044	6,7056	6,7069	6,7081
820	6,7093	6,7105	6,7117	6,7130	6,7142	6,7154	6,7166	6,7178	6,7190	6,7202
830	6,7214	6,7226	6,7238	6,7250	6,7262	6,7274	6,7286	6,7298	6,7310	6,7322
840	6,7334	6,7346	6,7358	6,7370	6,7382	6,7393	6,7405	6,7417	6,7429	6,7441
850	6,7452	6,7464	6,7476	6,7488	6,7499	6,7511	6,7523	6,7534	6,7546	6,7558
860	6,7569	6,7581	6,7593	6,7604	6,7616	6,7627	6,7639	6,7650	6,7662	6,7673
870	6,7685	6,7696	6,7708	6,7719	6,7731	6,7742	6,7754	6,7765	6,7776	6,7788
880	6,7799	6,7811	6,7822	6,7833	6,7845	6,7856	6,7867	6,7878	6,7890	6,7901
890	6,7912	6,7923	6,7935	6,7946	6,7957	6,7968	6,7979	6,7991	6,8002	6,8013

УДК 517  
(ДИТ)

ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ  $q$  кал/кг.



*I-S* ДИАГРАММА  
(Mollier)  
ДЛЯ ВОДЯНОГО ПАРА  
(по W. SCHÜLE).

ЭНТРОПИЯ  $S$  кал/кг °C,

УДАЛЕН  
(ДИТ)



## О Г Л А В Л Е Н И Е.

	СТР.
Предисловие . . .	3
Глава первая. Введение . .	5
Глава вторая. Основное уравнение теплового баланса котельной установки .	7
Глава третья. Рабочая теплопроизводительность топлива	10
Глава четвертая. Основные термохимические формулы сгорания .	20
Глава пятая. Теоретически необходимое количество воздуха	22
Глава шестая. Коэффициент избытка воздуха в топке	28
Глава седьмая. Состав и наименьшее количество продуктов сгорания одного килограмма топлива	30
Глава восьмая. Состав и количество продуктов полного сгорания одного килограмма топлива с коэффициентом избытка воздуха $\alpha > 1$	34
Глава девятая. Состав и количество продуктов сгорания одного килограмма топлива с коэффициентом избытка воздуха $\alpha > 1$ и при наличии в них окиси углерода .	49
Глава десятая. Состав и количество продуктов сгорания одного килограмма топлива с коэффициентом избытка воздуха $\alpha > 1$ и при наличии в них окиси углерода, водорода, метана и дыма	60
Глава одиннадцатая. Определение потери от механической неполноты сгорания топлива	69
Глава двенадцатая. Определение потери в окружающую среду	73
Глава тринадцатая. Присос воздуха в газоходах и его величина .	75
Глава четырнадцатая. Определение потери тепла с уходящими газами .	78
Глава пятнадцатая. Количество тепла, полезно использованное установкой .	83
Глава шестнадцатая. Количество тепла, введенное в топку	88
Глава семнадцатая. Коэффициент полезного действия котельной установки	91
Глава восемнадцатая. Выбор температуры уходящих газов .	95
Глава девятнадцатая. Определение температуры точки росы	99
Глава двадцатая. Определение теоретической температуры сгорания топлива .	104
Глава двадцать первая. Теплопередача	108
Глава двадцать вторая. Определение температуры в топке	128
Глава двадцать третья. Определение величины поверхности нагрева первого хода .	137
Глава двадцать четвертая. Определение поверхности нагрева паронегревателя	144
А. А. Надежин. Тепловой расчет котельной установки.	$\frac{1}{4}$ 14

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)

	СТР.
Глава двадцать пятая. Определение температуры газов за котлом.	150
Глава двадцать шестая. Определение поверхности нагрева экономайзера для подогрева воды	154
Глава двадцать седьмая. Определение поверхности нагрева экономайзера для подогрева воздуха	161
Глава двадцать восьмая. Определение поверхности нагрева водоподогревателей и испарителей.	164
Глава двадцать девятая. Определение мощности питательного насоса.	166
Глава тридцатая. К подсчету тяги	169
Глава тридцать первая. Определение главных размеров дымовой трубы	175
Глава тридцать вторая. Величины, характеризующие работу котельных установок.	179
Глава тридцать третья. Свод главнейших формул	189
Глава тридцать четвертая. Порядок расчета	196

### П Р И Л О Ж Е Н И Е (таблицы).

I. Элементарный состав русских топлив	202
II. Важнейшие физические величины для газов.	203
III. Теплота сгорания некоторых тел	204
IV. Насыщенный пар от $-20$ до $+9^{\circ}\text{C}$ .	204
V. от $+10$ до $+50^{\circ}\text{C}$	205
VI. от 0,02 до 25 абс. $\text{кг}/\text{см}^2$	. 206 — 207
VII. от 0 до $220^{\circ}\text{C}$	208
VIII. от 20 до 224,2 абс. $\text{кг}/\text{см}^2$	209
IX. от 200 до $374^{\circ}\text{C}$	210
X. Средние удельные теплоемкости между температурами насыщенного и перегретого пара (до $550^{\circ}\text{C}$ ) при давлениях от 0,5 до 30 абс. атм. ( $\text{кг}/\text{см}^2$ ) по О. Knoblauch и Е. Raisch	211
XI. Состав органической массы русских топлив.	. 212
XII. Натуральные логарифмы	. 213 — 216
I — S Диаграмма	216

### С П И С О К Т А Б Л И Ц (В ТЕКСТЕ).

ТАБЛ.	СТР.
1. Содержание азота в органической массе	14
2. Коэффициент избытка воздуха в топке	29
3. Состав и количество продуктов полного сгорания 1 $\text{кг}$ топлива при теоретически минимальном расходе сухого воздуха	31
4. Весовой состав продуктов сгорания 1 $\text{кг}$ подмосковного угля при $\alpha = 1$ (частный пример)	33
5. Объемный состав продуктов сгорания 1 $\text{кг}$ подмосковного угля при $\alpha = 1$ (частный пример)	34

НБ  
УДМУТ  
(ДИТ)

ТАБЛ.	СТР.
6. Состав и количество продуктов полного сгорания 1 кг топлива при расходе воздуха с коэффициентом избытка $\alpha$ .	35
7. Весовой состав продуктов сгорания 1 кг подмосковного угля при $\alpha = 1,4$ (частный случай)	41
8. Объемный состав продуктов сгорания 1 кг подмосковного угля при $\alpha = 1,4$ (частный случай)	42
9. Величины $\beta$ , $(\text{CO}_2)_{max}$ , $(\text{SO}_2)_{max}$ , $\lambda$ и $\mu$ для наиболее типичных русских топлив	45
10. Потеря от химической неполноты сгорания топлива	57
11. Потеря от механической неполноты сгорания топлива.	70
12. Потеря в окружающую среду.	74
13. Влияние избытка воздуха на теоретическую температуру сгорания.	107
14. Влияние загрязнений на коэффициент теплопередачи и на температуру стенки (по К. В. Кирш)	. 114 — 117
15. Таблица значений $\left(\frac{\omega'}{\omega''}\right)^{0,8}$	121
16. Коэффициент прямой отдачи.	. 129 — 130
17. Напряжение зеркала горения, объем топочного пространства и его теплонапряжение	136
18. Коэффициент теплопередачи первого хода	. 139 — 140
19. Коэффициент теплопередачи пароперегревателя.	147
20. Влажность пара, даваемого котлами	148
21. Коэффициент теплопередачи вторых ходов	151
22. Коэффициент теплопередачи экономайзера	155
23. Коэффициент полезного действия центробежных насосов	168
24. Выбор мощности электромотора по мощности на валу центробежного насоса.	168
25. Сопротивление топки	174
26. Коэффициент $A_1$ для подсчета сопротивлений по формуле (309)	175
27. Условная испарительность и коэффициент полезного действия	177
28. Коэффициент полезного действия и условная испарительность.	183
29. Допускаемые напряжения поверхностей нагрева паровых котлов.	184 — 185

### СПИСОК ЧЕРТЕЖЕЙ.

ФИГ.	СТР.
1. Схема котельной установки	8
2. Рабочая теплопроизводительность дров в зависимости от влажности.	15
3. Зависимость рабочей теплопроизводительности торфа от его влажности (при $A_c = 6\%$ ) и зависимость нижней теплопроизводительности абсолютно сухой массы торфа от его зольности	16
4. Характер зависимости потери тепла в окружающую среду от размера поверхности нагрева котла (для горизонтально-водотрубных котлов)	75
5. Зависимость средней теплоемкости от температуры для водяных паров, сухих дымовых газов и воздуха	79

НБ  
УДУНТ  
(ДИТ)

ФИГ.	СТР.
6. Зависимость средней теплоемкости от температуры для двуокиси углерода, кислорода, азота и окиси углерода .	81
7. Диаграмма изменения точки росы в зависимости от процентного содержания углекислоты в продуктах сгорания различных топлив при условии полного сгорания .	102
8. Изменение теоретической температуры сгорания $T_{г.}$ в зависимости от рода топлива и от $\alpha_{т.}$ (при полном сгорании)	105
9. Схема перехода тепла через стенку от нагретых газов к нагреваемым носителям тепла (вода, пар, воздух и т. п.)	109
10. Зависимость коэффициента прямой отдачи топки от рода топлива и от взаимного расположения топки и котла	131
11. Зависимость прямой отдачи от напряжений в нефтяной топке .	132
12. Влияние объема камеры сгорания на величину паронапряжения котла	134
13. Зависимость коэффициента теплопередачи в вертикальных котлах от средней температуры газов .	141
14. Диаграмма работы ребристого экономайзера Р. Каблиц .	156
15. Схема расположения точек для анализа при определении $\mu_{э.}$	159
16. Схема теплового баланса котельной установки при часовом расходе топлива $B$ кг	180
17. Диаграмма теплового баланса цельнокамерного парового котла при переменном режиме его работы по опытам ЛПК МВТУ	188

Сканувала Тараненко Т.В.

НБ  
УДУНТ  
(ДІІТ)